



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Mecânica  
**2015**

**José Carlos Costa  
Nogueira**

**ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DA LIGA  
DE TITÂNIO Ti6Al7Nb**





**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Mecânica  
**2015**

**José Carlos Costa  
Nogueira**

**ANÁLISE DA MAQUINABILIDADE DA LIGA  
DE TITÂNIO Ti6Al7Nb**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus pais por tudo o que fizeram por mim nesta enorme caminhada.



## **O júri**

Presidente

**Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva**  
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia  
do Porto

Orientador

**Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**  
Professor Associado com Agregação do Departamento  
de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, pelos conselhos e ensinamentos ao longo de todo o curso e da dissertação.

Ao Eng. Carlos Lauro, por toda a ajuda prestada na execução experimental do projeto e retirar todas as minhas dúvidas.

À *Tifast S.R.L.* (Itália), que forneceu o material para teste.

À Sandvik, pelo fornecimento das ferramentas de corte.

Aos meus pais, simplesmente por tudo! Muito OBRIGADO!

Às minhas irmãs, Nanda, Gena e Catarina, por sempre me apoiarem e me terem amparado sempre que precisei, tanto ao nível académico como pessoal.

À minha namorada, Diana, por toda a força, carinho e ajuda prestada ao longo da minha caminhada.

A toda a minha família mais chegada, por me ajudarem sempre que precisei e me darem bons conselhos.

Aos meus amigos da faculdade, que ficarão para a vida, de forma especial ao Bruno pela ajuda no projeto e todo o apoio.

A todos os meus colegas de futebol, pela paciência no final de uma semana de estudo.



**Palavras-chave**

Ligas de titânio, torneamento, ferramentas de corte, maquinabilidade, MQL, forças de corte, acabamento superficial, desgaste das ferramentas.

**Resumo**

No presente trabalho realizou-se um estudo sobre a maquinabilidade da liga de titânio Ti6Al7Nb, em operações de torneamento, usando uma pastilha de metal duro, com ângulo de inclinação negativo, sem revestimento e com quebra-aparas de classe S15. O uso desta liga está atualmente em expansão principalmente em áreas de grande responsabilidade, tal como a indústria biomédica.

O estudo foi realizado recorrendo a dois tipos de ensaios: ensaios de corte curtos e ensaios de corte longos. Nos ensaios de corte curtos foram avaliados parâmetros como a apara obtida, forças de corte e acabamento superficial da peça para diferentes parâmetros de corte. Nos ensaios de corte longos foi medido o desgaste na face de saída ( $V_{Bmáx}$ ) da ferramenta utilizada e determinada a curva de vida da mesma, segundo o modelo de Taylor. Foi ainda analisada a evolução da rugosidade superficial com o desgaste da ferramenta.

Em ambos os ensaios utilizou-se maquinagem sustentável, através da avaliação da influência da lubrificação MQL nas aparas obtidas, nas forças de corte, no acabamento superficial e tempo de vida da ferramenta.

Conclui-se do presente estudo que o uso de lubrificação MQL é benéfico, uma vez que diminui o valor das forças de corte, rugosidade superficial e aumenta por outro lado a vida da ferramenta. Já a geometria da ferramenta escolhida mostrou valores mais baixos de Ra quando comparados com os valores teóricos. Foi ainda possível concluir que as aparas obtidas são serrilhadas, maioritariamente do tipo helicoidal em gume longas.



**Keywords**

Titanium alloy, turning, cutting tools, machinability, MQL, cutting forces, surface finish, tool wear.

**Abstract**

In this work was carried out a study on the titanium alloy machinability Ti6Al7Nb, in turning operations, using a cemented carbide inserts with negative inclination angle, uncoated and S15 class chip-breaker. The use of this alloy is currently expanding mainly in areas of great responsibility, such as the biomedical industry.

The study was performed using two types of tests: short and long cutting tests. In short cut tests were evaluated parameters such as the chip obtained, cutting forces and the surface finish of the workpiece to different cutting parameters. In long cut tests was measured the wear on the output side ( $V_{Bmax}$ ) of the used tool, as well as the life curve of the same, according to the Taylor's model. It was also analyzed the evolution of the surface roughness with the tool wear.

In both tests were used sustainable machining, by assessing the influence of the obtained lubrication MQL chips, the cutting forces, the surface finish and life time from the tool.

In conclusion, this study shows that the use of MQL lubrication is beneficial because it reduces the value of cutting forces, surface roughness and increasing the tool life time. Otherwise, the geometry of the chosen tool showed lower values of Ra compared to the theoretical values. It was also possible to conclude that the chips obtained are serrated, mostly helical type on long edge.



## ÍNDICE

Lista de figuras.....	iii
Lista de tabelas.....	vii
Lista de símbolos .....	ix
1. Introdução.....	3
2. Maquinabilidade de ligas de titânio – Estado da Arte .....	9
2.1 Titânio e suas ligas.....	9
2.1.1 Metalurgia .....	9
2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas.....	12
2.1.3 Aplicações .....	13
2.1.4 Liga Ti6Al7Nb .....	15
2.2 Maquinagem do titânio e suas ligas .....	16
2.2.1 Parâmetros e ferramentas de corte.....	16
2.2.1.1 Parâmetros de corte .....	16
2.2.1.2 Ferramentas de corte.....	17
2.2.1.3 Maquinagem Sustentada.....	19
2.2.2 Condições de corte testadas .....	21
2.3 Maquinabilidade .....	22
2.3.1 Apara e mecanismo de formação .....	24
2.3.2 Desgaste e vida da ferramenta de corte.....	26
2.3.3 Forças de corte.....	29
2.3.4 Rugosidade / Precisão dimensional .....	31
2.4 Síntese .....	35
3. Metodologia experimental.....	39
3.1 Material ensaiado.....	39
3.2 Ferramentas de corte.....	40
3.3 Máquina-ferramenta.....	42
3.4 Parâmetros de corte utilizados nos ensaios .....	42
3.4.1 Estratégia de corte .....	43
3.5 Critérios de avaliação da maquinabilidade utilizados.....	46
3.5.1 Caracterização da apara .....	46
3.5.2 Medição do desgaste da ferramenta de corte .....	47
3.5.3 Forças de corte.....	48
3.5.4 Medição da rugosidade superficial .....	50

3.6	Maquinagem sustentável.....	52
3.7	Síntese .....	54
4.	Análise e discussão de resultados .....	57
4.1	Ensaio de corte curtos.....	57
4.1.1	Classificação da peça obtida .....	57
4.1.2	Forças de corte.....	63
4.1.2.1	Influência da velocidade de corte nas forças de corte .....	63
4.1.2.2	Influência do avanço nas forças de corte.....	64
4.1.2.3	Influência da profundidade nas forças de corte.....	65
4.1.2.4	Influência do desgaste da ferramenta e lubrificação nas forças de corte.....	66
4.1.3	Medição da rugosidade e acabamento superficial .....	67
4.1.3.1	Influência do avanço na rugosidade .....	67
4.1.3.2	Influência da profundidade de corte na rugosidade.....	69
4.1.3.3	Influência da velocidade de corte na rugosidade .....	70
4.1.3.4	Influência do desgaste da pastilha na rugosidade.....	71
4.1.3.5	Influência da lubrificação MQL na rugosidade .....	75
4.2	Ensaio de corte longos.....	76
4.2.1	Medição do desgaste da ferramenta.....	76
4.2.1.1	Influência da velocidade de corte e MQL no desgaste da ferramenta de corte.....	77
4.2.1.2	Influência do avanço no desgaste da ferramenta de corte .....	79
4.2.1.3	Influência da profundidade de corte no desgaste da ferramenta de corte.....	79
4.2.1.4	Vida da ferramenta de corte .....	80
4.2.2	Medição da rugosidade e acabamento superficial .....	83
5.	Conclusões .....	89
5.1	Trabalhos futuros.....	90
6.	Referências bibliográficas .....	93
	Anexo I - Certificado da qualidade da liga de titânio Ti6Al7Nb (Cortesia <i>Tifast S.R.L.</i> ).....	101
	Anexo II - Principais características do torno CNC utilizado nos ensaios práticos.....	105
	Anexo III - Valores obtidos nos ensaios experimentais, ensaios curtos.....	109
	Anexo IV - Valores obtidos nos ensaios experimentais, ensaios longos.....	115
	Anexo V - Descrição da referência das pastilhas de corte.....	121



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de próteses do joelho, à esquerda, e da anca, à direita (Bombac <i>et al.</i> , 2007).....	4
Figura 2 - Formas disponíveis de comercialização do titânio (Donachie, 2000). ....	9
Figura 3 - Estrutura cristalina assumida pelo titânio, (a) - fase $\alpha$ , (b) – fase $\beta$ (Peters, 2003). ....	10
Figura 4 – Exemplos de aplicação do titânio e suas ligas: a) turbina a gás (Donachie, 2000); b) espigão usado em medicina dentária (Ortopédicos, 2015); c) tacos usados na prática de golfe (Em10taque, 2013); d) jante de veículo automóvel (Tsuya design, 2015). ....	14
Figura 5 - Tendências do uso de fluído de corte na maquinagem (Stoeterau, 2004). ....	19
Figura 6 – Ilustração de maquinagem com MQL, a), e maquinagem com fluído de corte abundante, b) (Unist Australia, 2015). ....	20
Figura 7 - Comparação da maquinagem a seco, com fluído abundante e com MQL para: a) desgaste da ferramenta e b) rugosidade superficial (Dhar, Kamruzzaman e Ahmed, 2006). ....	21
Figura 8 - Fatores que influenciam a maquinabilidade de um material [Adaptado de Pervaiz <i>et al.</i> , 2014] .....	23
Figura 9 - Tipos de aparas: a) descontínua, b) contínua regular, c) contínua irregular, d) serrilhada (Groover, 2010). ....	24
Figura 10 – Formas das aparas obtidas em função do material utilizado, vista exterior (em cima) e corte transversal (em baixo) de Ti CP, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb e Latão para $V_c=56$ m/min, $f=0,02$ mm/rot e $a_p=0,4$ mm (Kikuchi e Okuno, 2004). ....	25
Figura 11 - Desgaste da ferramenta de corte na maquinagem de titânio e suas ligas (Ezugwu, 2005).....	26
Figura 12 - Variação do $V_B$ e $V_{Bmáx}$ com o volume de material removido para as velocidades de corte de 220 e 150 m/min (Sun, Brandt e Mo, 2014).....	27
Figura 13 - Desgaste da face de saída para 15 min de teste com ferramenta K15 (Arrazola, Garay e Iriarte, 2009). ....	28
Figura 14 - Fatores que influenciam a vida das ferramentas de corte [Adaptado de Murthy e Rajendran, 2012]. ....	28
Figura 15 - Força de corte dos metais em estudo para diferentes condições de corte (Kikuchi e Okuno, 2004).....	30
Figura 16 - Força de corte em função do avanço (Sun, Brandt e Dargusch, 2009). 30	
Figura 17 - Ilustração das forças de corte ( $F_c$ ) e avanço ( $F_f$ ) em função da velocidade de corte para a liga Ti-6Al-4V e Ti-55531 (Nouari e Makich, 2014).....	31
Figura 18 - Acabamento superficial para diferentes condições de corte: a) $R_a$ e b) $R_t$ (Kikuchi e Okuno, 2004).....	33
Figura 19 - Rugosidade média aritmética obtida no Ti5Al4Mo2Sn6Si2F com três ferramentas de corte (Nabhani, 2001).....	33
Figura 20 - Rugosidade superficial na maquinagem da liga Ti-6Al-4V (Çalışkan e Küçükköse, 2015). ....	34
Figura 21 - Valores da rugosidade superficial em função do avanço, velocidade de corte e geometria das ferramentas de corte (Hughes, 2006). ....	35

Figura 22 - Provette utilizado nos ensaios.....	40
Figura 23 - Ferramenta de corte utilizada nos ensaios: a) pastilha VNMG 160404-QM H13A, b) fixação da pastilha por grampo, c) porta ferramentas DVJNL 2020K16, cortesia Sandvik.....	41
Figura 24 - Torno CNC Kingsbury MHP 50 utilizado nos ensaios.....	42
Figura 25 - Identificação dos testes curtos no provete de ensaios.....	44
Figura 26 - Identificação dos testes longos no provete de ensaios.....	45
Figura 27 - Classificação da apara, segundo a norma ISO 3685/1993.....	46
Figura 28 - Medição do desgaste na face de ataque e saída das pastilhas de corte, segundo a norma ISO 3685/1993.....	47
Figura 29 - Microscópio ótico usado na medição do desgaste das ferramentas, incorporado com o sistema de iluminação e <i>software</i> Motic Images Plus 2.0.....	48
Figura 30 - Medição das forças de corte: a) dinamômetro piezoelétrico 9121, b) amplificador de sinal 5019B.....	49
Figura 31 - Sinal adquirido: a) com ruído, b) sem ruído, usando a Transformação Wavelet.....	50
Figura 32 - Medição da rugosidade: a) representação do rugosímetro em medição, b) representação do rugosímetro e ligação ao <i>software</i> utilizado.....	51
Figura 33 - Esquema de medição da rugosidade ao longo do provete de ensaio. ....	52
Figura 34 - Sistema MQL da UNIST utilizado nos ensaios: a) representação do aerossol externo, b) representação de todo o sistema MQL incorporado no torno CNC.....	53
Figura 35 - Organograma do procedimento experimental executado na presente dissertação.....	54
Figura 36 - Apara vista ao microscópio ótico, em corte transversal, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm: a) $V_c=30$ m/min, a seco, b) $V_c=30$ m/min, com MQL c) $V_c=120$ mm/min, a seco, d) $V_c=120$ mm/min, com MQL.....	63
Figura 37 - Comparação das forças de corte para diferentes velocidades usando $f=0,1$ mm/rot, $a_p=0,5$ mm, pastilhas novas, a seco. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências.....	64
Figura 38 - Forças de corte usando $V_c=30$ m/min, $a_p=0,5$ mm e dois avanços, $f=0,1$ mm/rot e $f=0,05$ mm/rot. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ....	65
Figura 39 - Forças de corte usando $V_c=30$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e duas profundidades de corte, $a_p=0,50$ mm e $a_p=0,25$ mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências.....	65
Figura 40 - Comparação das forças de corte para pastilhas novas e desgastadas, a seco e com MQL, usando $V_c=30$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências.....	66
Figura 41 - $R_a$ em função do avanço, para as velocidades de corte testadas, a seco.....	68
Figura 42 - $R_t$ em função do avanço, para as velocidades de corte testadas, a seco.....	68
Figura 43 - $IT$ em função do avanço para as velocidades de corte testadas, a seco.....	69
Figura 44 - $R_a$ em função da profundidade de corte, para as velocidades de corte testadas, a seco.....	70
Figura 45 - $R_a$ em função da velocidade de corte, para $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, a seco.....	71

Figura 46 - Ra em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, a seco, usando $a_p=0,5$ mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ....	71
Figura 47 - Rt em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, a seco, usando $a_p=0,5$ mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ....	72
Figura 48 - Ra em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, com MQL: a) profundidade de corte de 0,5 mm, b) profundidade de corte de 0,25 mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ....	73
Figura 49 - Rt em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, com MQL: a) profundidade de corte de 0,5 mm, b) profundidade de corte de 0,25 mm Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ....	74
Figura 50 - Ra em função da velocidade de corte, para maquinagem a seco e com MQL, usando $a_p=0,5$ mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ...	75
Figura 51 - Rt em função da velocidade de corte, para maquinagem a seco e com MQL, usando $a_p=0,5$ mm. Os valores representam a média $\pm$ DP de 3 experiências. ...	76
Figura 52 - Evolução $V_B$ em função do tempo de corte para as velocidades de 30 e 90 m/min, a seco e com MQL, usando $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm. ....	77
Figura 53 - Evolução do $V_B$ em função do tempo de corte para diferentes avanços, usando $V_c=30$ m/min e $a_p=0,5$ mm. ....	79
Figura 54 - Evolução do $V_B$ em função do tempo de corte para diferentes profundidades de corte, usando $V_c=90$ m/min e $f=0,1$ mm/rot.....	80
Figura 55 – Representação da vida da ferramenta de corte para maquinagem a seco. ....	81
Figura 56 – Comparação do tempo de vida para: a) diferentes velocidades de corte (30 e 90 m/min), b) diferentes avanços (0,1 e 0,3 mm/rot), c) diferentes profundidades de corte (0,5 e 1 mm), d) seco e com MQL. ....	83
Figura 57 – Evolução da Ra em função do $V_B$ para $V_c=30$ m/min e $V_c=90$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, a seco.....	84
Figura 58 - Evolução da Rt em função do $V_B$ para $V_c=30$ m/min e $V_c=90$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, a seco. ....	84
Figura 59 - Aspeto final do provete para $V_c=30$ m/min, $f=0,3$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm. ....	85
Figura 60 - Efeito da difícil evacuação da apara no aspeto final do provete, nos ensaios a seco.....	85



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de várias ligas, segundo a sua estrutura (Donachie, 2000).	11
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas do titânio (Donachie, 2000).	12
Tabela 3 - Comparação entre as propriedades do titânio puro, a liga Ti-6Al-4V e Ti-6Al-7Nb, bem como de alumínio 7075-O e do aço AISI-1045 (Machado e Wallbank, 1990).	13
Tabela 4 – Parâmetros de corte recomendados para o torneamento de titânio e suas ligas (Donachie, 2000).	17
Tabela 5 - Condições de corte, em torneamento de ligas de titânio, usadas por diversos autores.	21
Tabela 6 - Comparação da maquinabilidade de ligas de titânio com outros materiais (Donachie, 2000).	23
Tabela 7 – Rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) dos principais materiais utilizados na zona funcional da articulação artificial (Mattei <i>et al.</i> , 2011).	35
Tabela 8 - Resultados obtidos para o $V_B$ , forças de corte e $R_a$ na maquinagem de diferentes ligas de titânio, por diversos autores.	36
Tabela 9 - Composição química da liga Ti6Al7Nb utilizada nos ensaios ( <i>Tifast S.R.L.</i> ).	39
Tabela 10 - Características físicas e mecânicas da liga Ti6Al7Nb utilizada nos ensaios ( <i>Tifast S.R.L.</i> ).	39
Tabela 11 - Identificação e geometria da ferramenta utilizada nos ensaios.	41
Tabela 12 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios curtos.	43
Tabela 13 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos.	43
Tabela 14 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a $V_c=30$ m/min, a seco e com MQL.	58
Tabela 15 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a $V_c=60$ m/min, a seco e com MQL.	59
Tabela 16 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a $V_c=90$ m/min, a seco e com MQL.	60
Tabela 17 - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a $V_c=120$ m/min, a seco e com MQL.	61
Tabela 18 - Classificação referente às formas das aparas obtidas nos ensaios de corte curtos, segundo a norma ISO 3685/1993.	62
Tabela 19 - Desgaste da ferramenta de corte, face de saída e ataque, observado ao microscópio ótico, referente a todos os parâmetros de corte utilizados.	78
Tabela 20 – Tempo de vida da ferramenta usada nos ensaios, para todos os parâmetros de corte usados.	80
Tabela 21 - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas e MQL.	111
Tabela 22 - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas e MQL.	111
Tabela 23 - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas, a seco.	112

Tabela 24 - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas, a seco.....	112
Tabela 25 - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas, a seco.....	113
Tabela 26 - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas, a seco.....	113
Tabela 27 - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas e MQL. ....	114
Tabela 28 - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas e MQL. ....	114
Tabela 29 – Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para $V_c=30$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, a seco. ....	117
Tabela 30 - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para $V_c=90$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, a seco. ....	118
Tabela 31 - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para $V_c=90$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=1$ mm, a seco. ....	119
Tabela 32 - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para $V_c=30$ m/min, $f=0,3$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, a seco. ....	119
Tabela 33 - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para $V_c=30$ m/min, $f=0,1$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm, com MQL.....	120

## LISTA DE SÍMBOLOS

AIMMAP	Associação dos Industriais Metalúrgicos Metalomecânicos e Afins de Portugal
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
a <sub>p</sub>	Profundidade de corte
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbono
CBN	Nitreto cúbico de boro
CCC	Cúbica de corpo centrado
Co	Cobalto
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DP	Desvio padrão
f	Avanço
Fa	Força de avanço
Fc	Força de corte
FeTiO <sub>3</sub>	Ilmenita
Fa <sub>p</sub>	Força de penetramento
Fx	Força de penetramento
Fy	Força de avanço
Fz	Força de corte
GPa	Giga Pascal
HC	Hexagonal compacta
HfN	Nitreto de háfnio
HV	Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization
IT	Intervalo de tolerância
J/(kg.K)	Joule por quilograma kelvin
K	Kelvin
Kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
kJ/(kg.K)	QuiloJoule por quilograma Kelvin
KT	Profundidade máxima da cratera
kW	QuiloWatt
Lc	Cut-off
Lt	Comprimento total de palpagem
Lub	Lubrificação
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm/rot	Milímetro por rotação
Mo	Molibdênio
MPa	Mega Pascal
MQL	Minimal Quantity of Lubrification
N	Azoto
Nb	Nióbio

nm	Nanómetro
O	Oxigénio
PCD	Diamante Policristalino
PIB	Produto Interno Bruto
Ra	Rugosidade média aritmética
Rt	Amplitude máxima da rugosidade
Rta	Rugosidade média aritmética teórica
Rtt	Amplitude máxima da rugosidade teórica
Rz	Profundidade média da rugosidade
re	Raio de curvatura da ponta
Si	Silício
Sn	Estanho
T	Temperatura
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
TiB <sub>2</sub>	Diboreto de titânio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
Ti-CP	Titânio comercialmente puro
TiN	Nitreto de titânio
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
UA	Universidade de Aveiro
UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular
V	Vanádio
V <sub>B</sub>	Desgaste na face de saída
V <sub>Bmáx</sub>	Desgaste máximo na face de saída
V <sub>c</sub>	Velocidade de corte
W/(m.K)	Watt por metro Kelvin
WC	Carboneto de tungstênio
Zr	Zircónio
$\alpha$	Alfa
$\alpha$	Ângulo de saída
$\beta$	Beta
°C	Graus Celsius
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\mu\text{m}/(\text{m.K})$	Micrómetro por metro Kelvin
$\mu\text{m}.\Omega$	Micrómetro Ohm
$\chi$	Ângulo de posição
$\lambda_s$	Ângulo de inclinação



---

# Capítulo 1

---

Introdução

---



## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, a forte evolução da sociedade na procura de todo o tipo de componentes metálicos e não-metálicos, por forma a satisfazer as necessidades do dia-a-dia, faz com que seja necessário uma maior aposta na investigação, com a perspetiva de alcançar um conhecimento detalhado do processo de fabrico que constitui esses mesmos componentes.

Com a revolução industrial, a procura por peças de metal sofreu um forte aumento, sendo necessário implementar, com maior rigor, métodos e técnicas capazes de as trabalhar.

Em Portugal, segundo a AIMMAP – “*Associação dos Industriais Metalúrgicos, Metalomecânicos e Afins de Portugal*”, o setor metalomecânico contempla uma posição central no âmbito da indústria e economia em geral, uma vez que representa 18% do PIB e 30% das exportações do país, ultrapassando a barreira dos 13 mil milhões de euros de produtos exportados, relativamente ao ano de 2014.

No que toca a matéria-prima que seja necessária a sua transformação para a forma final através da remoção de material, a maquinagem tem um papel fundamental, uma vez que esta tecnologia permite alcançar formas desejadas com elevada precisão, que de outro modo seriam impensáveis de obter.

O processo de corte de metais, vulgarmente chamado de processo de maquinagem, é um processo industrial em que as peças que se pretendem fabricar são obtidas pela remoção do material indesejado, sob a forma de aparas (Stephenson e Agapiou, 2005).

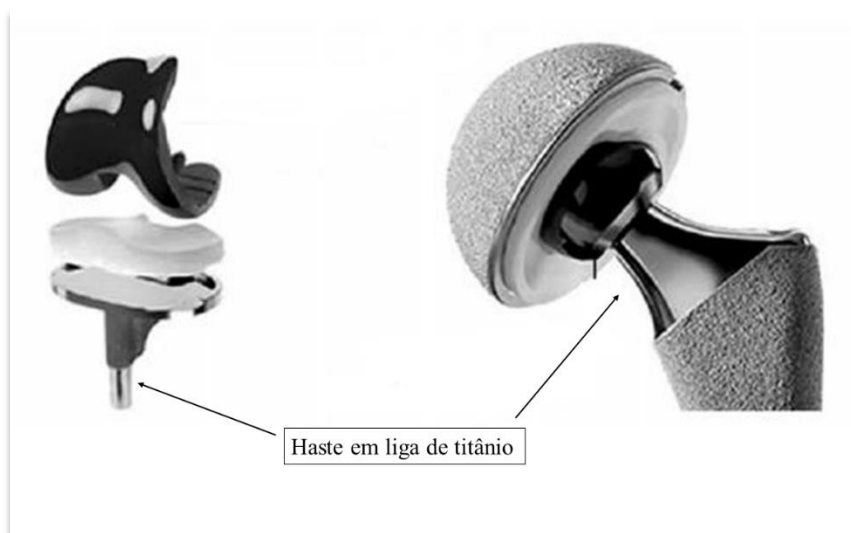
Segundo Shaw (1968, 1984), citado por Davim (2008), “*o processo de formação da apara é complicado e variável, e apenas pode ser explicado por uma combinação de mecanismos que dependem de aspetos metalúrgicos (material da peça e da ferramenta), da temperatura de corte e dos gradientes desenvolvidos, da espessura da apara, que condicionam as tensões, e do ângulo de ataque e do estado de afiamento da ferramenta, que afetam o sistema de forças aplicado*”.

A necessidade de estudo dos processos de maquinagem surge pela complexidade da sua execução bem como pelo elevado aspeto económico que a mesma acarreta. Sendo um processo definido como bastante dispendioso, o custo da maquinagem ultrapassa os 15% do valor total de gastos em todos os produtos fabricados, nos países industrializados (Merchant, 1998).

Apesar da sua importância económica e tecnológica, os processos de maquinagem continuam a ser dos menos compreendidos, possivelmente devido às dificuldades na compreensão do mecanismo de formação de apara, bem como na maquinagem de materiais.

Existindo uma panóplia de parâmetros de corte envolvidos no processo de maquinagem, muitos são os investigadores que estudam a melhor forma de os otimizar, tendo como principal objetivo obter as melhores variáveis de corte possíveis, tornando assim a maquinagem por arranque de apara um processo cada vez mais rentável e capaz de colmatar eventuais lacunas existentes na produção de componentes, sejam eles metálicos ou não-metálicos.

Desde há vários anos, a maquinagem do titânio, bem como das suas ligas, é muito requerida por parte da indústria, tendo sofrido recentemente uma maior procura por parte da indústria biomédica. Este facto deve-se sobretudo à utilização em próteses, por exemplo do joelho ou da anca, como mostra a Figura 1, uma vez que apresenta características especialmente favoráveis para o seu uso, tais como grande resistência à corrosão, biocompatibilidade, propriedades mecânicas favoráveis, entre outros (Breme, Eisenbarth e Biehl, 2003). No entanto, o titânio e as suas ligas são classificadas como de difícil maquinabilidade, uma vez que lhe são intrínsecas propriedades como a baixa condutibilidade térmica e alta reatividade química, por exemplo (Donachie, 2000).



**Figura 1** – Exemplo de próteses do joelho, à esquerda, e da anca, à direita (Bombac *et al.*, 2007).

Para além do titânio no estado puro, as ligas deste material têm sido também muito procuradas, como é o caso da liga Ti6Al7Nb em estudo no presente relatório, uma vez que apresenta excelente biocompatibilidade para implantes cirúrgicos, substituição de tecidos e próteses (Donachie, 2000). Aliada a estas características, o elemento nióbio presente nesta liga pretende substituir o vanádio da liga Ti6Al4V, usada em grande escala até então, tendo o nióbio a vantagem de não ser um elemento químico tóxico, ao contrário do vanádio.

Dado o crescente uso do titânio e das suas ligas, principalmente na área médica, é ampliada a necessidade de otimizar a maquinagem de titânio, elevando assim o desempenho dos produtos. Para além do desempenho é importante fazer a avaliação destes metais quando trabalhados sobre uma maquinagem sustentável, conhecida como “*green machining*”.

A presente dissertação tem como principal objetivo a análise e avaliação da maquinabilidade da liga Ti6Al7Nb, recorrendo ao torneamento cilíndrico exterior de provetes previamente disponibilizados, utilizando ferramentas de corte de metal duro com ângulo de inclinação negativo e utilizando o conceito de maquinagem sustentável, sendo esta

ao nível da lubrificação como da não toxicidade do material. Assim sendo, a avaliação e análise da maquinabilidade será feita através dos seguintes aspetos:

- I. Avaliação das aparas resultantes dos ensaios de corte;
- II. Medição das forças de corte envolvidas no processo de maquinagem da liga em estudo;
- III. Avaliação da rugosidade superficial e precisão dimensional dos provetes maquinados;
- IV. Medição do desgaste da ferramenta de corte utilizada e determinação do seu tempo de vida;
- V. Avaliação da utilização de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) na maquinagem.

Para o cumprimento dos objetivos acima mencionados, foram realizados testes de corte curtos e longos, onde os primeiros dão resposta a tópicos como a avaliação das aparas, medição de forças ou avaliação da rugosidade, para além da influência da lubrificação MQL nestes parâmetros, e os segundos abordam para além da rugosidade e influência da lubrificação MQL o desgaste da ferramenta de corte utilizada.

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos, onde cada um deles representa uma continuação do anterior.

No **capítulo 1** está inserida a presente introdução onde é indicado o tema a explorar, a área onde este se inclui, os objetivos a que se propõe esta dissertação e descrita a organização da mesma.

O **capítulo 2** descreve a revisão bibliográfica realizada, isto é, são analisados aspetos relevantes acerca do titânio e suas ligas e descritos alguns resultados de trabalhos efetuados anteriormente por diversos autores na área da maquinabilidade de ligas de titânio.

No **capítulo 3** é relatado todo o procedimento experimental levado a cabo ao longo da dissertação, procedimento esse que vai desde o material e máquina utilizados até à descrição pormenorizada de cada tipo de ensaios, curtos e longos, bem como dos equipamentos utilizados e respetivos *softwares* de aquisição de dados.

No **capítulo 4** são apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais e posteriormente analisados e discutidos. Este capítulo está subdividido em resultados obtidos para os ensaios de corte curtos e longos, sendo que os resultados, análises e discussões são apresentados de forma separada e independente para cada tipo de ensaio.

O **capítulo 5** apresenta as principais conclusões retiradas dos ensaios experimentais, indicando ainda algumas perspetivas futuras para trabalhos a realizar nesta área.

A metodologia utilizada para a elaboração da presente dissertação foi o método descritivo, expositivo, experimental, critico-reflexivo e pesquisa bibliográfica.

Este percurso é encerrado com a apresentação das referências bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação (**capítulo 6**), assim como dos anexos elaborados (**capítulo 7**).



---

# Capítulo 2

---

Maquinabilidade de ligas de  
titânio – Estado da arte

---





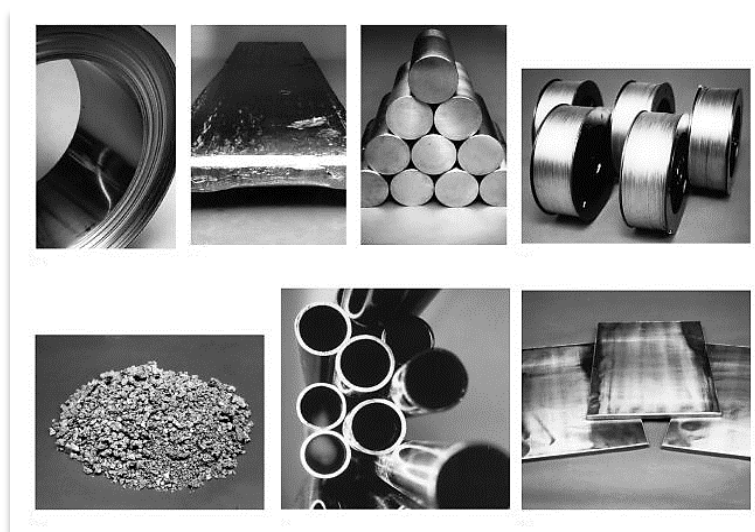
## 2. MAQUINABILIDADE DE LIGAS DE TITÂNIO – ESTADO DA ARTE

Este capítulo visa a contextualização teórica sobre o tema abordado, maquinagem de titânio e suas ligas, acedendo para isso a recursos bibliográficos, tais como artigos, livros, revistas ou teses. É dada ênfase à metalurgia do titânio, maquinabilidade, forças de corte, rugosidade superficial e tipo e formas de aparas obtidas.

### 2.1 TITÂNIO E SUAS LIGAS

O titânio é um elemento químico metálico de símbolo Ti, que em estado puro apresenta uma cor cinzenta e brilhante, sendo um metal de transição com número atômico 22, situado no quarto grupo e quarto período da tabela periódica. Foi descoberto em 1791 por William Gregor, sendo encontrado na natureza sob a forma de mineral, em que o mais comum é a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), minério mais impuro, e ainda o rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), minério mais puro (Peters, 2003).

Quanto ao aspeto comercial, tanto o titânio como as suas ligas podem ser produzidos e comercializados de variadas formas: folha, barra, tubo, fundido, etc., como mostra a Figura 2.

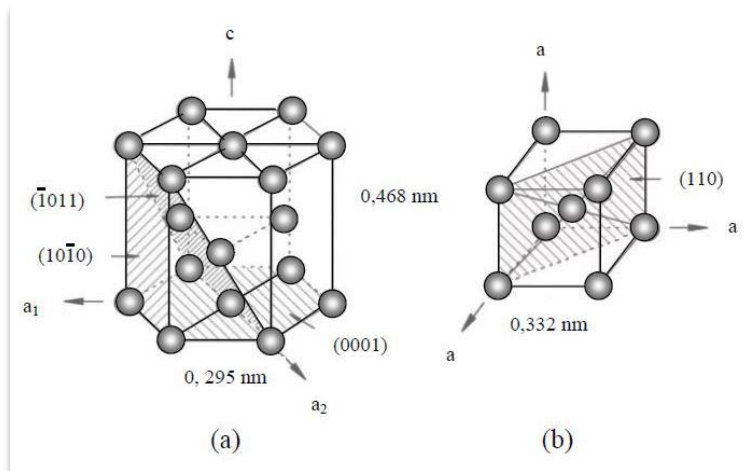


**Figura 2** - Formas disponíveis de comercialização do titânio (Donachie, 2000).

#### 2.1.1 Metalurgia

À temperatura ambiente, e quando comercialmente puro, o titânio apresenta uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), conhecida como fase alfa ( $\alpha$ ). Quando elevada a sua temperatura acima dos  $882,5^\circ\text{C}$ , ocorre uma transformação de fase que altera a sua

estrutura para cúbica de corpo centrado (CCC), denominada de fase beta ( $\beta$ ) (ver Figura 3), mantendo-se esta até aos 1672°C, dando-se a partir daí a passagem do material ao estado líquido (Peters, 2003).



**Figura 3** - Estrutura cristalina assumida pelo titânio, (a) - fase  $\alpha$ , (b) – fase  $\beta$  (Peters, 2003).

Perante a possibilidade do titânio e das suas ligas se encontrarem em várias fases, descritas anteriormente, o seu campo de aplicações é variadíssimo, podendo incluir-se na indústria aeroespacial, na área médica, na indústria automóvel, entre muitos outros.

Certo é que as ligas de titânio têm uma gama bastante abrangente, diferenciando bastante a sua constituição de aplicação para aplicação. Esta diferenciação está diretamente relacionada com a composição química e os tratamentos térmicos empregues podendo, de acordo com a natureza das suas microestruturas, ser classificadas em três categorias:  $\alpha$ ,  $\beta$  e ainda  $\alpha+\beta$  (Peters, 2003).

A caracterização do tipo de liga faz-se pela presença de determinado tipo de estabilizadores, isto é, quando são agregados no titânio elementos químicos que produzem um pequeno aumento da temperatura na transformação de fase, tais como Alumínio (Al), Azoto (N), Oxigénio (O) ou Carbono (C), estes estabilizadores são denominados de  $\alpha$ , conhecidos por alfa-géneos. A adição destes elementos tende a aumentar a dureza e a resistência mecânica, sendo geralmente de densidade inferior (Veiga, Davim e Loureiro, 2012).

Por outro lado, quando se está perante elementos químicos que diminuem a temperatura de transformação de fase, tais como Vanádio (V), Nióbio (Nb) ou Molibdénio (Mo) estes denominam-se por estabilizadores  $\beta$  (Welsch, Boyer e Collings, 1993), também conhecidos por beta-géneos. As ligas que contêm estes estabilizadores apresentam geralmente um baixo módulo de elasticidade e são maioritariamente biocompatíveis (Barry, Byrne e Lennon, 2001). Contrariamente, são ligas impróprias para aplicações a baixas temperaturas e propícias à fratura, pois se a elevadas temperaturas apresentam grande ductilidade, a baixas

temperaturas tornam-se frágeis, sendo preferidas para aplicações em que é necessária a resistência a quente (Collings, 1984).

Os estabilizadores  $\alpha$  e  $\beta$  não surge apenas isolados um do outro, aparecendo na maioria dos casos juntos na mesma liga, sendo que mais de 70% dos materiais à base de titânio usados pertencem a esta classe (Donachie, 1982). Aquando da união destes dois estabilizadores, sendo que poderão existir mais do que um elemento de cada estabilizador (Collings, 1984), o objetivo principal passa por garantir uma boa resistência mecânica para temperaturas elevadas, boas condições de maquinabilidade, boa soldabilidade, ótima relação resistência/peso e ainda boa resistência à corrosão (Weiss *et al.*, 1997).

Estas ligas são formuladas de tal forma que a fase  $\alpha$  (HC) e a fase  $\beta$  (CCC) coexistem à temperatura ambiente, sendo que a fase  $\beta$  suporta entre 10 a 50% do volume total (Donachie, 1982). Dada a estabilidade das fases à temperatura ambiente, é possível alterar a microestrutura através de tratamentos térmicos, podendo no entanto a soldabilidade ficar comprometida quando se atinge 20% da fase  $\beta$ .

Entre todas as ligas de titânio, a liga Ti-6Al-4V é a mais utilizada atualmente. Esta liga foi desenvolvida na década de 50 pelo Instituto de Tecnologia de Illinois, EUA. Devido à combinação de ótimas propriedades mecânicas, esta liga foi largamente testada e estudada, inicialmente para o uso na indústria aeroespacial, estendendo-se depois a outras áreas. Apesar desta liga se destacar na classe do tipo  $\alpha+\beta$ , foram desenvolvidas e estudadas outras, tais como Ti-6Al-7Nb ou Ti-6Al-4Mo-2Sn-0,5Si.

Na Tabela 1 é possível verificar a classificação de várias ligas de titânio, usadas de uma forma mais abundante, segundo a sua estrutura.

**Tabela 1** - Classificação de várias ligas, segundo a sua estrutura (Donachie, 2000).

MATERIAL/LIGAS	CLASSIFICAÇÃO
Titânio puro	$\alpha$
Ti-5Al-2,5Sn	$\alpha$
Ti-6Al-4V	$\alpha+\beta$
Ti-6Al-7Nb	$\alpha+\beta$
Ti-6Al-4Mo-2Sn-0,5Si	$\alpha+\beta$
Ti-13V-11Cr-3Al	$\beta$
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	$\beta$
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	$\beta$

Sumariamente, poder-se-á dizer que as ligas do tipo  $\alpha$ , no qual se inclui o titânio puro, apenas possuem estabilizadores  $\alpha$ , sendo que a quantidade de estabilizadores  $\beta$  é diminuta (2-5% do volume), assim como as ligas do tipo  $\beta$  possuem uma grande quantidade de estabilizadores  $\beta$ . Já as ligas cuja composição à temperatura ambiente leva à existência de uma mistura de estabilizadores  $\alpha$  e  $\beta$ , são designados por ligas  $\alpha+\beta$ .

### 2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas

As propriedades mecânicas são o fator preponderante na escolha de um determinado material a usar numa certa aplicação. Propriedades como a dureza, tensão máxima nominal ou módulo de elasticidade, são aquelas que maior relevância apresentam.

De acordo com El-Sonbaty, Khashaba e Machaly (2004), sendo as propriedades e a aplicação o principal fator a ter em conta na hora de escolher o material, torna-se fundamental conhecer propriedades, como por exemplo a dureza e a resistência mecânica, uma vez que estas são algumas das que mais influenciam a maquinabilidade de um material.

O titânio é um elemento com cerca de 60% da densidade do aço, ou seja baixa densidade, podendo no entanto ser alterado de forma a melhorar as suas propriedades mecânicas. Possui uma densidade de  $4510 \text{ kg/m}^3$ , um ponto de fusão na ordem dos  $1668^\circ\text{C}$  e mudança de fase situada nos  $882,5^\circ\text{C}$ .

O titânio comercialmente puro (Ti-CP) é indicado como o metal não nobre mais resistente à corrosão, devendo-se esta propriedade à formação espontânea de uma camada de óxido sobre a superfície. Quando exposto ao ar, o titânio reage formando uma camada de óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) que alcança uma espessura entre 2 e 10 nm. É esta camada superficial de óxido que fornece a base da sua elevada resistência à corrosão, bem como a biocompatibilidade (Eisenbarth *et al.*, 2002).

Na Tabela 2 encontram-se algumas das propriedades físicas e mecânicas do titânio.

**Tabela 2** - Propriedades físicas e mecânicas do titânio (Donachie, 2000).

PROPRIEDADES	VALOR
Número Atômico	22
Estrutura Cristalina	
$\alpha$ (Alpha), $T \leq 882,5^\circ\text{C}$	<i>Hexagonal Compacta</i>
$\beta$ (Beta), $T \geq 882,5^\circ\text{C}$	<i>Cúbica de Corpo Centrada</i>
Cor	<i>Cinza</i>
Densidade	$4510 \text{ kg/m}^3$
Ponto de Fusão	$1668 \pm 10^\circ\text{C}$
Ponto de Ebulição	$3260^\circ\text{C}$
Calor Específico (a 298K)	$0,5223 \text{ kJ/(kg.K)}$
Condutividade Térmica	$11,4 \text{ W/(m.K)}$
Peso Específico	4,5
Dureza	$127 \text{ a } 134 \text{ HV}$
Tensão Nominal Máxima	$241 \text{ MPa}$
Módulo de Elasticidade	$120 \text{ GPa}$
Resistividade Elétrica	$0,420 \mu\Omega.m$

Algumas aplicações requerem propriedades, nomeadamente mecânicas, melhoradas. Perante isto, é possível adicionar elementos de liga ao titânio e mudar as suas propriedades descritas na Tabela 2. A dureza, tensão de rutura ou tensão limite de elasticidade são algumas das propriedades que sofreram bastante alteração com a adição destes elementos.

Na Tabela 3 encontra-se uma análise comparativa das propriedades entre o titânio comercialmente puro, duas ligas de titânio usadas frequentemente, alumínio AA7075-O e o aço AISI-1045, sendo estes dois últimos metais vulgarmente utilizados na indústria.

**Tabela 3** - Comparação entre as propriedades do titânio puro, a liga Ti-6Al-4V e Ti-6Al-7Nb, bem como de alumínio 7075-O e do aço AISI-1045 (Machado e Wallbank, 1990).

	Ti (CP)	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-7Nb	AISI-1045	AA7075-O
Tensão limite de elasticidade ( <i>MPa</i> )	170	900	965	530	103
Tensão Nominal Máxima ( <i>MPa</i> )	241	1000	1060	625	228
Módulo de Elasticidade ( <i>GPa</i> )	102	110	105	207	71,1
Extensão após rutura (%)	15	18	12	12	17
Dureza ( <i>HV</i> )	220	241	280	179	68
Densidade ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	4510	4430	4520	7840	2800
Condutividade Térmica ( <i>W/mK</i> )	6	7,3	7,5	50,7	170
Calor específico ( <i>J/kg.K</i> )	518	580	550	486	960

Da análise da Tabela 3 verifica-se que fatores como a baixa densidade, quando comparado com o aço de elevada resistência, torna as ligas de titânio num material muito requerido para o uso em aplicações de maior ênfase. Comparativamente com o titânio puro, as ligas deste material apresentam uma resistência substancialmente maior, suportando níveis de deformação consideráveis até que se dê a rutura.

Verifica-se também que as ligas de titânio apresentam propriedades de resistência/densidade elevadas em comparação com o aço. Podem também de igual forma substituir as ligas de alumínio, aludindo a uma resistência mecânica substancialmente maior (Boyer, 1996).

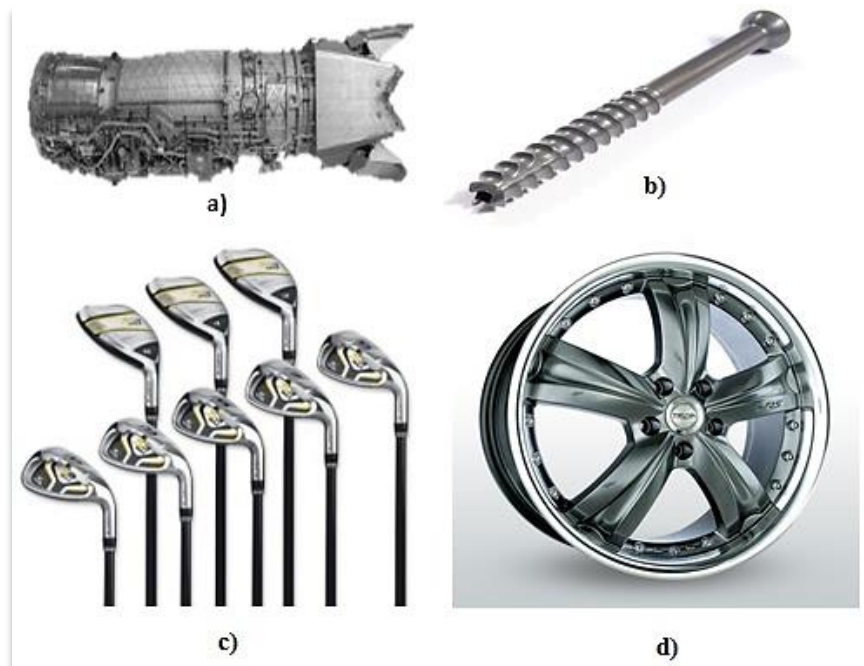
### 2.1.3 Aplicações

Devido às suas propriedades como metal puro, e conjugado ainda com outros elementos previamente estudados, o titânio e as suas ligas são empregues em inúmeras aplicações, tendo em conta os requisitos específicos dessa mesma aplicação. Como tal, este metal possui uma grande aplicação em atividades como:

- I. **Indústria aeroespacial** – a sua grande aplicação nesta área deve-se essencialmente ao peso reduzido das ligas de titânio, a elevada resistência à corrosão, bem como a resistência mecânica (Donachie, 2000). Todos estes fatores tornam os dispositivos aéreos mais leves e com uma durabilidade e garantia de qualidade de fabrico maior;

- II. **Indústria aeronáutica** – a resistência mecânica e à corrosão são os grandes impulsionadores da aplicação nesta área, já que devido ao ambiente em que estão geralmente inseridos, estes componentes (maioritariamente ambientes salinos) tornam-se características essenciais (Machado e Wallbank, 1990);
- III. **Indústria nuclear** – em equipamentos que possuem uma elevada temperatura, por exemplo regeneradores de calor (Nelson, 1989), são também aplicadas essas ligas, já que a sua resistência no que concerne à temperatura é elevada;
- IV. **Indústria automóvel** – tal como na indústria aeroespacial, os fatores como a elevada resistência mecânica e peso reduzido são importantíssimos na indústria automóvel;
- V. **Aplicações biomédicas** – uma forte procura relativamente recente em relação às ligas de titânio surge na área médica, já que este material tem uma grande biocompatibilidade, assim como uma baixa toxicidade e alta resistência à corrosão (*Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, 2006), vindo assim a substituir os aços inoxidáveis usados até então.

Na Figura 4 são apresentados diversos produtos fabricados em titânio e em ligas derivadas.



**Figura 4** – Exemplos de aplicação do titânio e suas ligas: a) turbina a gás (Donachie, 2000); b) espigão usado em medicina dentária (Ortopédicos, 2015); c) tacos usados na prática de golfe (Em10taque, 2013); d) jante de veículo automóvel (Tsuya design, 2015).

#### 2.1.4 Liga Ti6Al7Nb

Como referido anteriormente, a alteração da estrutura cristalina do titânio puro, através de tratamentos térmicos e da adição de elementos de liga, é a base para o desenvolvimento da extensa gama de ligas de titânio.

Focando a atenção nas aplicações biomédicas, o titânio é fortemente utilizado na substituição de tecidos duros, como ossos ou dentes, em aplicações cardíacas, como é o caso das válvulas cardíacas, no fabrico de próteses, entre outros (Veiga, Davim e Loureiro, 2012), devido às suas características favoráveis, como é o caso da baixa densidade, elevada resistência e boa biocompatibilidade. Porém, o uso do titânio puro limita bastante a gama de aplicações a que pode ser empregue, já que as suas propriedades mecânicas não são as melhores. Quando o objetivo é empregar o titânio em implantes ortopédicos e outras aplicações de elevado desempenho, recorre-se às ligas de titânio ao invés deste metal no seu estado puro, onde a adição dos diferentes elementos de liga permite uma melhoria significativa das suas propriedades, consoante o requerido.

Desde muito cedo a liga Ti-6Al-4V foi aquela que apresentava as melhores propriedades para o uso em próteses, bem como noutros serviços de cariz médico, sendo esta uma liga do tipo  $\alpha+\beta$  em que o seu estabilizador alfa-géneo é o Alumínio, sendo o Vanádio o beta-géneo. Muitos estudos e investigações foram efetuadas nesta liga, pretendendo sempre melhorar as suas propriedades intrínsecas, bem como obter um maior conhecimento sobre a sua maquinabilidade.

No entanto, depois de vários anos de aplicação da liga Ti-6Al-4V na área biomédica, a realização de alguns estudos nos finais dos anos 70, vieram caracterizar esta liga como tendo um elemento tóxico, o Vanádio (Semlitsch *et al.*, 1992).

Segundo Khan, Williams e Williams (1999), a biocompatibilidade desta liga foi posta em causa devido à dissolução de iões de alumínio e vanádio podendo causar efeitos tóxicos, sendo atualmente testadas outras alternativas.

Num dos seus estudos, Laing (1967) refere-se à reação adversa causada por várias ligas e materiais nos tecidos corporais, fazendo referência também à liga Ti-6Al-4V.

A partir da realização dos estudos que colocavam em causa a biocompatibilidade da liga Ti-6Al-4V, surge a implantação na área biomédica da liga Ti-6Al-7Nb, comercialmente disponível desde 1990, sendo esta muito semelhante no que diz respeito a propriedades físicas e mecânicas com a liga anterior.

Khan, Williams e Williams (1999) referem que a liga Ti-6Al-7Nb foi desenvolvida usando o elemento de liga nióbio para substituir o vanádio na liga Ti-6Al-4V, já que tanto o vanádio como o nióbio têm relações de fases semelhantes. Já o alumínio continua a ser usado como o estabilizador de fase alfa, mantendo assim as propriedades mecânicas melhoradas em relação ao titânio puro.

Como refere Bombac *et al.* (2007), novas ligas de titânio estão a ser desenvolvidas especificamente para aplicações biomédicas, incluindo as ligas ortopédicas Ti-6Al-7Nb e Ti-5Al-2.5Fe, tendo as duas propriedades semelhantes à liga Ti-6Al-4V.

Como descrito anteriormente, a diferença entre estas duas ligas citadas, Ti-6Al-4V e Ti-6Al-7Nb, reside de facto no seu estabilizador do tipo  $\beta$ , que neste caso já não será o vanádio, mas sim o elemento químico nióbio, eliminando assim um componente tóxico e indesejável. Esta liga pertence também ao tipo de microestrutura  $\alpha+\beta$ , em que o estabilizador do tipo  $\alpha$  é o alumínio.

## 2.2 MAQUINAGEM DO TITÂNIO E SUAS LIGAS

Todos os métodos de processamento de metais, tais como o titânio e suas ligas, requerem um conhecimento aprofundado de todos os parâmetros que poderão influenciar a sua maquinagem, por forma a proporcionar uma qualidade máxima, bem como uma minimização de custos, prolongando a vida das ferramentas de corte e consequente aumento da eficiência de produção. De entre diversos fatores importantes estão os parâmetros de corte, bem como a geometria e materiais das ferramentas.

### 2.2.1 Parâmetros e ferramentas de corte

Uma maquinagem eficiente requer o acesso a dados relativos aos parâmetros e ferramentas a usar numa dada liga, cujas propriedades devem ser conhecidas, visto que influenciam nomeadamente as forças de corte, potência de corte, a vida útil da ferramenta, a aplicação de fluido de corte e a escolha do material da ferramenta (Donachie, 2000).

Na próxima secção são abordados aspetos relevantes da maquinagem do titânio e suas ligas, onde se dá ênfase aos parâmetros e ferramentas de corte, bem como à lubrificação e sua ausência, citando diversas investigações e testes realizados por diversos autores referenciados.

#### 2.2.1.1 Parâmetros de corte

Quando as condições de maquinagem são seleccionadas de forma adequada para cada material e seu processamento específico, então podem ser alcançados níveis de custos de maquinagem aceitáveis (Donachie, 2000).

Diversos autores (Donachie, 2000; Wang, Nakashima e Larson, 2014) defendem que para uma maquinagem eficiente do titânio e suas ligas devem ser levados em conta, de uma forma superior, os seguintes parâmetros:



- I. Baixa velocidade de corte, minimizando assim a temperatura na zona de corte e prolongando a vida da ferramenta;
- II. Altas velocidades de avanço, dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante;
- III. Grande quantidade de fluído de corte, reduzindo as forças de corte e efetuando uma maior dissipação do calor;
- IV. Ferramentas sempre afiadas, proporcionando um corte sem deflexão na peça e melhor acabamento;
- V. Nunca interromper o avanço da ferramenta enquanto houver contacto desta com a peça, por prejuízo de poder causar fratura da ferramenta.

No caso do torneamento, os valores da velocidade de corte, bem como o avanço, variam consoante o tipo de liga. Se por um lado são usadas velocidades de corte na ordem dos 160 m/min para o titânio puro e ligas de menor dureza, para as ligas de maior dureza esses valores podem decrescer até 11 m/min. Na Tabela 4 são apresentados alguns parâmetros de corte recomendados para o torneamento de titânio e das suas ligas.

Segundo Rahman, Wong e Zareena (2003), para aumentar a vida da ferramenta de corte deverá ser assumida uma velocidade de corte inferior a 60 m/min para a maquinagem de ligas de titânio.

Já Nabhani (2001) para testar o material das ferramentas de corte utilizou como parâmetros pré-definidos a velocidade de corte 75 m/min, avanço de 0,25 mm/rot assim como uma profundidade de corte de 1 mm.

**Tabela 4** – Parâmetros de corte recomendados para o torneamento de titânio e suas ligas (Donachie, 2000).

Material	Dureza (HB)	Largura de corte (mm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Material da ferramenta
Comercialmente Puro, Ti 99,0%	110 – 170	1,0	160	0,13	K30
		4,0	137	0,25	K20
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.80Mo ( $\alpha$ )	300 – 340	1,0	66	0,13	K30
		4,0	56	0,20	K20
		7,5	43	0,25	K20
Ti-6Al-4V ( $\alpha+\beta$ )	310 – 350	1,0	52	0,13	K30
		4,0	44	0,20	K20
		7,5	34	0,25	K20
Ti-10V-2Fe-3Al ( $\beta$ )	350 – 440	1,0	36	0,13	K30
		4,0	27	0,20	K20
		16,0	11	0,38	K20

#### 2.2.1.2 Ferramentas de corte

Tal como os parâmetros de corte, as ferramentas têm bastante influência na maquinagem de qualquer material.

Na globalidade, as ferramentas de carbonetos sinterizados são aquelas com maior empregabilidade na indústria, devendo-se em muito ao aparecimento de técnicas de revestimento que lhe permitem melhorar as propriedades mecânicas, bem como a resistência

ao desgaste. Estas técnicas de revestimento podem ser de dois tipos: um em que ocorre uma deposição química em fase de vapor (CVD), e outro em que o revestimento é efetuado através de deposição física em fase de vapor (PVD) (Davim, 2008).

No que à maquinagem do titânio e suas ligas diz respeito, as ferramentas de corte requerem grande resistência ao desgaste, tal como uma dureza a quente adequada. As ferramentas de metal duro, como graus K20 e K30, permitem de certa forma otimizar as taxas de produção deste metal, sendo que os desenvolvimentos mais recentes de materiais novos não elevaram a produtividade de forma significativa. No entanto, vários autores escreveram sobre a escolha das ferramentas de corte para a maquinagem do titânio e suas ligas, sendo que as conclusões são muito semelhantes.

De acordo com Rahman, Wong e Zareena (2003) e Ezugwu e Wang (1997), citando Welsch, Boyer e Collings (1993), as ferramentas de aço rápido de uso geral como M1, M2, M7 e M10 são geralmente empregues na maquinagem do titânio, no entanto, são obtidos melhores resultados com aços de grau T5, T15, M33 e M40. Já os melhores resultados são obtidos com as ferramentas de carbonetos de grau K, sendo que as de carboneto de tungsténio são a melhor opção.

Ezugwu e Wang (1997) referem que os carbonetos com revestimento de TiC, TiCN, TiN-TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC, TiN-Ti(C,N)-TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfN e TiB<sub>2</sub> apresentam taxas de desgaste superiores quando comparado com ferramentas sem revestimento, o que torna o seu uso na maquinagem do titânio e suas ligas desaconselhado.

Por outro lado, as ferramentas com insertos de carbonetos de tungsténio (WC-Co) revestidas com TiAlN, denotam uma maior resistência ao desgaste e aumento da estabilidade química, quando comparadas com as mesmas ferramentas sem revestimento (Nouari e Makich, 2014).

Se por um lado as ferramentas de carbonetos têm uma enorme empregabilidade devido à conjugação qualidade/custo, Rahman, Wong e Zareena (2003), citando Nabhani (2001), referem que apesar de muito dispendiosas relativamente às anteriores, as ferramentas de material ultra duros, como o nitreto cúbico de boro (CBN) e o diamante policristalino (PCD), apresentam taxas de desgaste inferiores e um acabamento superficial melhor.

Num dos seus estudos, Corduan, Himbart e Poulachon (2003), compararam o PCD, CBN e ferramentas revestidas com TiB<sub>2</sub>, onde concluíram que as ferramentas de CBN apresentaram um tempo de vida mais prolongado do que aquelas revestidas com TiB<sub>2</sub>. O mesmo estudo recomendou o uso de ferramentas de CBN para operações de acabamento.

Tal como o material constituinte das ferramentas, abordado até este parágrafo, a geometria das mesmas também tem bastante influência na caracterização da maquinagem, bem como na vida das ferramentas. Komanduri e Reed (1983) citado por Ezugwu e Wang (1997), sugeriu que uma nova geometria da ferramenta, que consistia num elevado ângulo de saída (entre 10 e 15°), bem como um ângulo de ataque negativo elevado, aumentaria significativamente a vida das ferramentas de carbonetos de tungsténio.

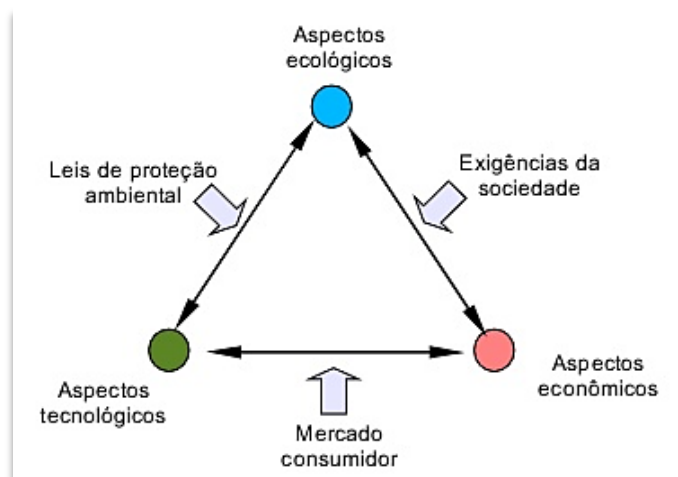
### 2.2.1.3 Maquinagem Sustentada

Um dos pontos cruciais na maquinagem do titânio e suas ligas é a elevada temperatura na interface peça/ferramenta, dada a baixa condutividade térmica do material. Elevadas temperaturas podem causar desvios dimensionais, bem como uma falha prematura da vida da ferramenta (Dhar, Kamruzzaman e Ahmed, 2006).

Por forma a reduzir a temperatura de corte na maquinagem de ligas de titânio, e assim aumentar a produtividade, são aplicadas técnicas de refrigeração eficientes, tais como o uso de fluido de corte. Se por um lado a redução da temperatura é o objetivo principal, a lubrificação, bem como a remoção da apra e melhoria do acabamento superficial, são aspetos importantes aquando do uso de fluido de corte (Sredanovic e Globocki-Lakic, 2013).

Dada a atual preocupação com o meio ambiente e a procura de uma maquinagem sustentável, as técnicas de uso de fluido de corte sofreram as devidas alterações, pretendendo-se obter, se possível, uma maquinagem a seco ou uso equilibrado da quantidade de fluido, em detrimento do uso abundante.

Até à poucos anos atrás, a indústria preocupava-se exclusivamente com a minimização de custos e aumento da produção, sendo que atualmente os aspetos ambientais estão na ordem do dia, impondo às diversas indústrias, leis de sustentabilidade rígidas. A Figura 5 mostra a tendência do uso de fluídos de corte na maquinagem.



**Figura 5** - Tendências do uso de fluido de corte na maquinagem (Stoeterau, 2004).

O uso de maquinagem a seco, bem como a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), surgem como alternativa ao uso abundante de fluido de corte, sendo que o último fornece vários benefícios em maquinagem (Dhar, Kamruzzaman e Ahmed, 2006). Na Figura 6 é possível comparar a maquinagem usando a técnica MQL com a convencional, recorrendo a fluido de corte abundante.



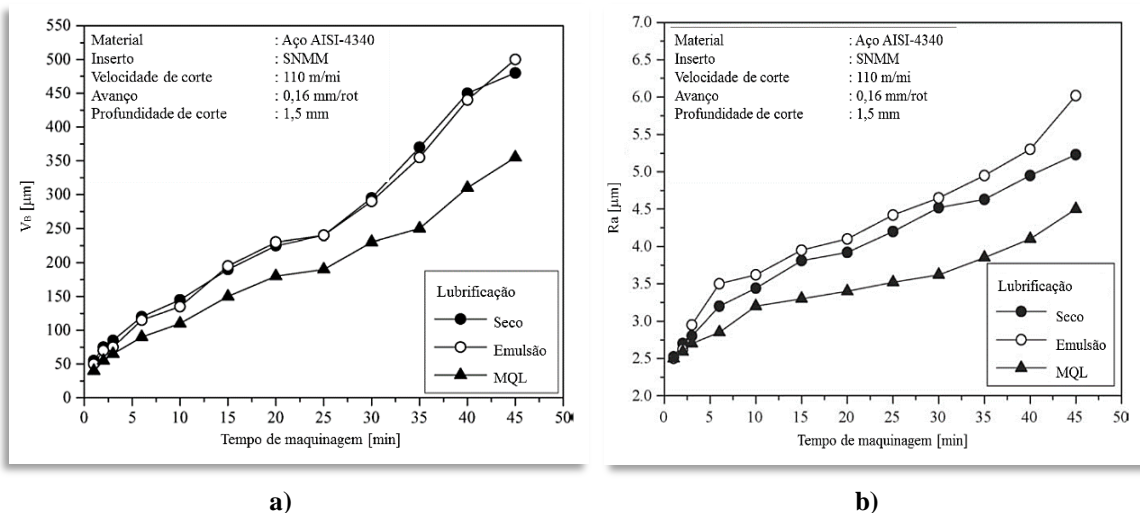
**Figura 6** – Ilustração de maquinagem com MQL, a), e maquinagem com fluído de corte abundante, b) (Unist Australia, 2015).

A técnica MQL surge no sentido de reduzir o uso de fluídos de corte e, consequentemente, eliminar a poluição do meio ambiente provocada por estes fluídos, bem como reduzir os custos de maquinagem. Este princípio baseia-se no uso de uma pequena quantidade de fluído de corte misturado com um fluxo de ar comprimido e empregue junto da interface de contacto entre a ferramenta e a peça. Desta forma, pode-se reduzir o atrito entre estas duas componentes, bem como a força de corte e temperatura, melhorando ainda a integridade da superfície (Liu *et al.*, 2013).

Gaitonde (2010), citando Dhar *et al.*, (2006), refere que o uso de MQL corresponde a uma pequena quantidade de caudal de fluído de corte, tipicamente na gama de 50 a 500 ml/h, significando cerca de três ou quatro ordens de grandeza mais baixas do que o uso de fluído abundante.

Estudos realizados em torneamento com o aço AISI 1040 permitiram concluir que a mistura de ar com óleo é melhor do que o sistema convencional de fluído abundante (Dhar *et al.*, 2006). Quanto ao desempenho mecânico, comparando a maquinagem a seco com MQL, esta última favorece a redução da temperatura de corte, das forças de corte, do desgaste das ferramentas e melhora o acabamento superficial (Dhar, Ahmed e Islam, 2007). Já no aço AISI 4340, usando ferramenta de metal duro não revestido, a taxa de desgaste, bem como a rugosidade superficial, foram menores com MQL, como mostra a Figura 7 (Dhar, Kamruzzaman e Ahmed, 2006).

Fazendo uma alusão a ligas de titânio, como por exemplo a liga Ti-6Al-4V, estas são maquinadas usando os dois métodos, maquinagem a seco e com recurso a fluído de corte, pelo que ultimamente tem-se recorrido a testes com lubrificação MQL, entrando assim no campo da maquinagem sustentável.



**Figura 7** - Comparação da maquinagem a seco, com fluido abundante e com MQL para: a) desgaste da ferramenta e b) rugosidade superficial (Dhar, Kamruzzaman e Ahmed, 2006).

## 2.2.2 Condições de corte testadas

Nesta secção são apresentadas as condições de corte usadas por diversos autores na maquinagem de ligas de titânio, em torneamento, Tabela 5.

**Tabela 5** - Condições de corte, em torneamento de ligas de titânio, usadas por diversos autores.

Autores	Material	V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	Ferramenta	Lubrificação/ Refrigeração
Kikuch e Okuno (2004)	Ti6Al7Nb	28 56	0,02	0,2 0,4	Carbonetos revestidos (TiAlN)	Seco
Khanna e Davim (2015)	Ti10.2.3 Ti54M Ti6Al4V	40 80	0,1 0,15 0,25	2	Carbonetos sinterizados (Sandvik TNMG 160408 – 23 H13A)	Seco
Ezugwu e Silva (2005)	Ti6Al4V	150 200 250	0,15	0,5	Carboneto com insertos CBN	Emulsão
Wang e Ezugwu (1997)	Ti6Al4V	76-97	0,13-0,25	2	Carbonetos revestidos PVD (TiN)	Emulsão
Özel et al. (2010)	Ti6Al4V	120	0,075 0,1 0,125	-	Carbonetos revestidos (TiAlN e TiAlN + CBN)	Seco
Ezugwu e Lai (1995)	Ti6Al4V	150 200 250	0,15	0,5	CBN	Emulsão
Velásquez, Tidu e Bolle, (2010)	Ti6Al4V	20-660	0,12	-	Diamante (Sandvik TCMW 16T030)4	Seco

**Tabela 5 - Continuação**

<b>Autores</b>	<b>Material</b>	<b>Vc [m/min]</b>	<b>f [mm/rot]</b>	<b>a<sub>p</sub> [mm]</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Lubrificação/ Refrigeração</b>
<b>Raza, Pervaiz e Deiab (2014)</b>	Ti6Al4V	90 120	0,1 0,2	0,8	Carbonetos não revestidos ( <i>Sandvik CCMT 09T308 – KM H13A</i> )	Seco MQL Ar Emulsão Criogénico
<b>Karaguzel et al.(2014)</b>	Ti6Al4V	45	0,4	0,2	Carbonetos revestidos ( <i>Sandvik RCMT 2507M0 4225</i> )	MQL
<b>Liu et al. (2013)</b>	Ti6Al4V	40-60	0,05-0,2	0,3- 1,2	-	Seco MQL Emulsão

## 2.3 MAQUINABILIDADE

O conceito maquinabilidade descreve a aptidão, alta ou baixa, que um material tem para ser trabalhado por maquinagem. Segundo Kosaka, Fanning e Fox (2004), citados por Khanna e Davim (2015), a maquinabilidade é definida como a maior ou menor facilidade de trabalhar o material por maquinagem. Considerando os critérios gerais, a maquinabilidade é avaliada segundo: a vida da ferramenta de corte, acabamento superficial, temperatura de corte, forças de corte e forma da apara (Khanna e Davim, 2015).

Para Ezugwu e Wang (1997), a maquinabilidade do titânio é considerada reduzida devido a várias propriedades inerentes aos materiais. Os autores destacam a reatividade química elevada e a baixa condutividade térmica que afetam de forma adversa a vida útil da ferramenta.

Numa avaliação sobre a maquinagem do titânio e suas ligas, Donachie (2000) elabora uma listagem sobre as principais propriedades que tornam o titânio num material de difícil maquinabilidade:

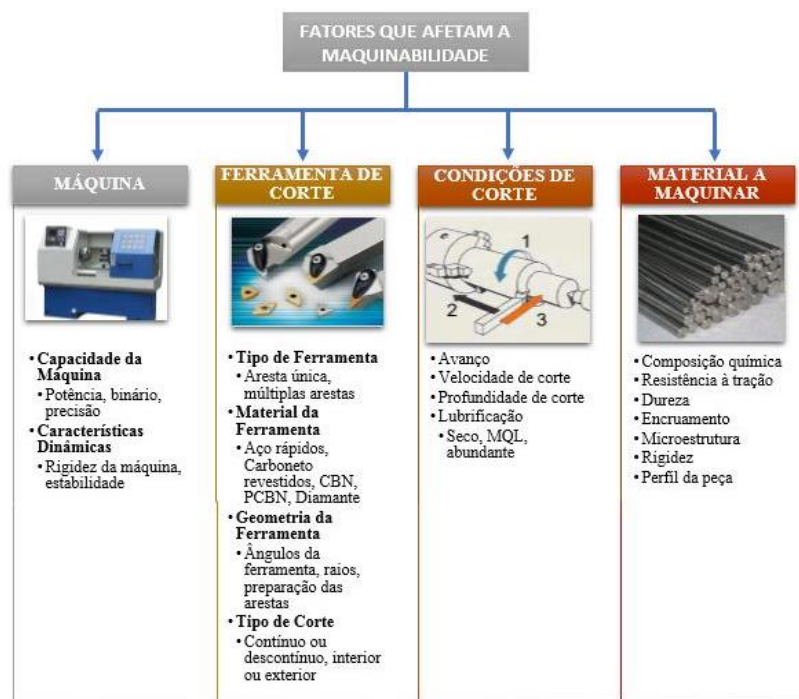
- I. **Baixa condutividade térmica:** concentrando-se uma grande temperatura na ferramenta, o que a afeta de forma adversa;
- II. **Elevada afinidade química:** provocando fenómenos de adesão da apara à ferramenta;
- III. **Baixo módulo de elasticidade:** tem um menor módulo de elasticidade do que o aço, o que resulta muitas das vezes numa deflexão da peça, provocando alteração no acabamento superficial;
- IV. **Suscetível a danos superficiais:** sendo que isto se verifica bastante em processos de retificação;
- V. **Encruamento:** as ligas de titânio demonstram uma ausência de aresta postiça de corte, o que resulta num aumento de calor na ferramenta, que combinado com as forças produzidas, origina um rápido colapso da ferramenta.

Por forma a quantificar a maquinabilidade de um material, esta é classificada através de um índice, denominado índice de maquinabilidade, que usa como padrão o aço AISI B-1112, considerado um aço de corte fácil, com índice de 100%. Perante isto, materiais de índice superior ao do material padrão são classificados como de elevada maquinabilidade, assim como os de índice inferior são denotados como de reduzida maquinabilidade. Na Tabela 6 são apresentados valores de maquinabilidade do titânio e algumas das suas ligas, bem como de outros materiais. É possível verificar desde logo que as ligas de titânio apresentam índices de maquinabilidade entre 60 a 80% inferiores ao do material padrão.

**Tabela 6** - Comparação da maquinabilidade de ligas de titânio com outros materiais (Donachie, 2000).

LIGA	CONDIÇÃO	ÍNDICE DE MAQUINABILIDADE
Liga de alumínio 2017	Tratado por solução e envelhecimento	300
Aço AISI B-1112	Endurecido	100
Liga de aço 4340	Recozido	45
Titânio puro	Recozido	40
Ti-5Al-2.5Sn	Recozido	30
Ti-6Al-4V	Recozido	22
Ti-6Al-6V-2Sn	Recozido	20

Na Figura 8 é apresentado um quadro resumo com os principais fatores que influenciam a maquinabilidade de um material.



**Figura 8** - Fatores que influenciam a maquinabilidade de um material [Adaptado de Pervaiz *et al.*, 2014]

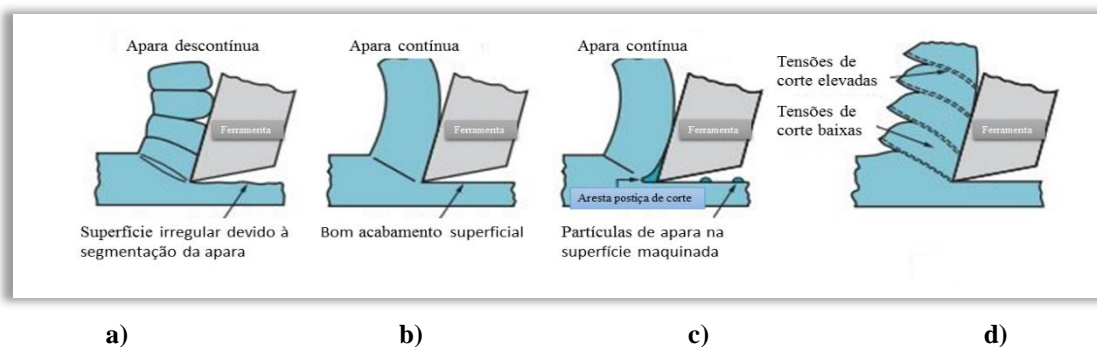


### 2.3.1 Apara e mecanismo de formação

A aparta é o excesso de material que foi retirado na obtenção de uma peça final, ou seja, é o material indesejado que é removido em forma de apartas, de modo a produzir peças acabadas com as dimensões pretendidas.

O processo de formação de aparta inicia-se com o primeiro contacto entre a aresta de corte da ferramenta e o material a processar, provocando o recalque de uma porção de material contra a face de ataque. Segundo Groover (Groover, 2010), a formação de aparta depende do tipo de material a maquinar, bem como das condições de corte usadas, sendo que se pode apresentar sob quatro tipos, ilustrados na Figura 9:

- I. **Descontínua**, característica de materiais frágeis maquinados a baixas velocidades, tendendo a dar uma textura irregular à superfície maquinada;
- II. **Contínua regular**, característica de materiais dúcteis maquinados a altas velocidades e relativamente pequenos avanços e profundidades, resultando geralmente num bom acabamento superficial da superfície maquinada;
- III. **Contínua irregular**, característica da maquinação de materiais dúcteis maquinados a baixas velocidades, formando geralmente aresta postíça e superfície maquinada áspera;
- IV. **Serrilhada**, aparência idêntica aos dentes de serra que são produzidos através da alternância entre tensões de corte baixas e elevadas. Associa-se à maquinação de ligas de titânio e superligas à base de níquel, quando maquinados a altas velocidades.



**Figura 9** - Tipos de aparta: a) descontínua, b) contínua regular, c) contínua irregular, d) serrilhada (Groover, 2010).

Para um mesmo material podem ser obtidas diferentes formas de aparta, devendo-se isto essencialmente às condições de corte usadas e à geometria da ferramenta. A diminuição da velocidade de corte bem como o aumento do avanço, favorecem a fragmentação da aparta. No entanto, a forma da aparta deve ser controlada através da geometria das ferramentas, uma

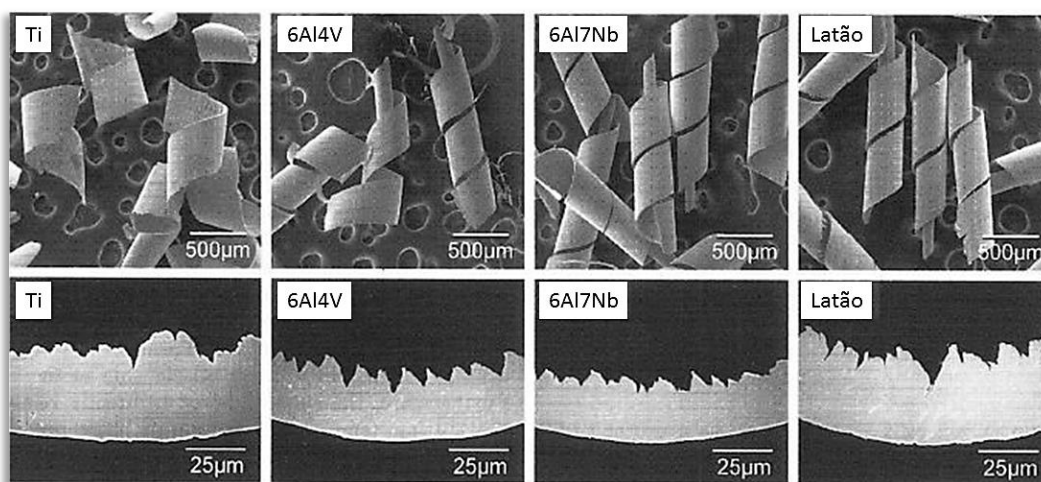


vez que os parâmetros de corte devem ser tais que favoreçam a vertente económica da maquinagem.

No que concerne ao titânio e suas ligas, a maquinagem origina aparas serrilhadas, resultado das instabilidades no processo de corte para uma certa gama de velocidades. A resistência mecânica do material diminui substancialmente com o aumento da temperatura na zona do corte, sendo isto transversal a materiais com fracas propriedades térmicas. O movimento da ferramenta de corte contra a peça, provoca tensões elevadas, sendo que o material é deformado. Perante o aumento da deformação, a temperatura aumenta, o que diminui a dureza do material, sendo este obrigado a sair da peça através do deslizamento pela ferramenta de corte. Dado que este é processo continuado, a deformação imposta na apara faz com que o plano de tensão sofra uma rotação e se afaste do plano normal da ferramenta de corte. Com o aumento da rotação, a força criada é maior, o que a partir de certo ponto faz quebrar a apara. Todo este processo, de uma forma continuada, resulta num ciclo de produção de apara serrilhada (Machado *et al.*, 2009). Esta forma é diferente da do tipo contínuo, que é característica da maquinagem da maioria dos materiais sujeitos a condições de corte convencionais (Barry, Byrne e Lennon, 2001).

A formação da apara serrilhada na maquinagem do titânio e suas ligas varia de acordo com a microestrutura, sendo que só se verifica nas ligas  $\alpha + \beta$  e ligas  $\beta$ . Já no titânio puro, verifica-se a ausência de formação de aparas serrilhadas, mesmo para velocidades de corte elevadas (Machado e Wallbank, 1990).

Kikuchi e Okuno (2004), estudaram a maquinabilidade de vários materiais, entre os quais a liga Ti-6Al-7Nb, do qual concluíram que esta apresenta uma apara tubular, onde a sua secção transversal mostra um dentado em forma de serra, característico desta liga. Na Figura 10 está exposta a forma da apara obtida para diferentes ligas, visualizadas ao microscópio.



**Figura 10** – Formas das aparas obtidas em função do material utilizado, vista exterior (em cima) e corte transversal (em baixo) de Ti CP, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb e Latão para  $V_c=56$  m/min,  $f=0,02$  mm/rot e  $a_p=0,4$  mm (Kikuchi e Okuno, 2004).

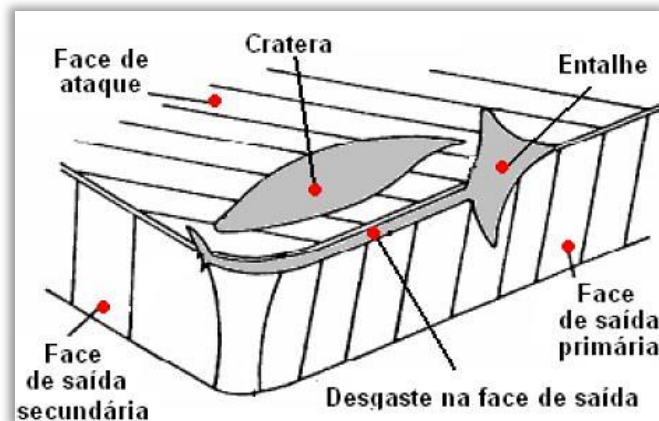
### 2.3.2 Desgaste e vida da ferramenta de corte

O fenómeno de desgaste da ferramenta de corte no processo de maquinagem é dependente do material e da geometria da própria ferramenta, do material da peça de trabalho, dos parâmetros de corte, uso ou não de fluídos de corte e das características da máquina.

A vida útil de uma ferramenta de corte é definida como o tempo de corte efetivo das suas arestas em trabalho, antes que seja necessário afiá-la ou substituí-la (Davim, 2008). Assim, o objetivo do estudo do desgaste e vida das ferramentas é avaliar qual o seu tempo de corte antes de a substituir, verificando o desempenho dessa mesma ferramenta.

Geralmente, o desgaste nas ferramentas de corte dá-se na face de ataque e na face de saída e é medido tendo em conta o desgaste em cada uma dessas faces, como mostra a Figura 11. Dando-se maioritariamente de uma forma gradual, o desgaste na face de saída ( $V_B$  ou  $V_{Bmáx}$ ) é aquele em que a análise recai, para avaliar o momento em que a ferramenta deverá ser substituída.

O desgaste das ferramentas de corte identificado no parágrafo anterior é provocado por um conjunto de fenómenos tais como: a reação química, o lascar, o fraturar, a deformação plástica, a fadiga, a difusão e a abrasão, sendo os dois últimos os mais dominantes na maquinagem do titânio (Hartung, Kramer e Turkovich (1982) citados por Pramanik (2013).



**Figura 11** - Desgaste da ferramenta de corte na maquinagem de titânio e suas ligas (Ezugwu, 2005).

O cálculo do tempo de vida da ferramenta de corte é efectuado, geralmente, recorrendo ao modelo de Taylor, Equação 1:

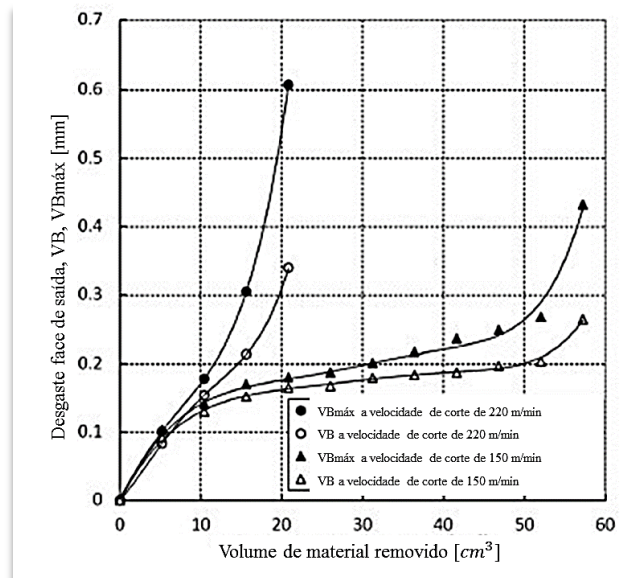
$$T \times V_c^x = K \quad (1)$$

onde  $T$  é a vida útil da ferramenta [min],  $V_c$  é a velocidade de corte [m/min],  $x$  e  $K$  são constantes da equação. A determinação das constantes da equação é realizada recorrendo ao tempo de vida, obtido experimentalmente, para duas velocidades de corte diferentes, mantendo no entanto o avanço e a profundidade de corte em ambos os ensaios.

Por forma a obter uma informação global sobre o desgaste e vida das ferramentas de corte, são apresentados de seguida resultados experimentais de diversos autores. Neste sentido, é medido o tempo de vida das ferramentas de corte, medição essa realizada através do valor de desgaste na face de saída, definição de tempo de corte e avaliação do desgaste ou volume de material removido pela pastilha, aquando da maquinagem do titânio e suas ligas.

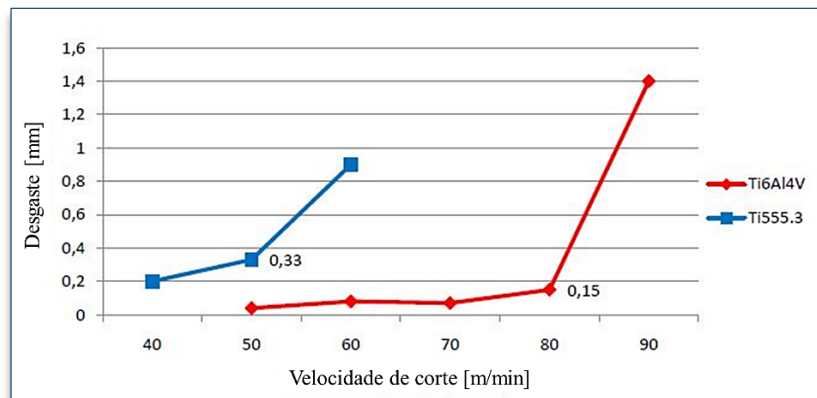
Pramanik (2013) referiu que as ferramentas de cerâmicos e CBN, quando utilizadas na maquinagem de titânio, apresentam grande desgaste na face de saída e de ataque. Já os carbonetos de tungsténio (K10) desgastam-se rapidamente logo após 5 minutos de corte a baixa velocidade (100 m/min), sem refrigeração, sendo que com fluído de corte o desgaste é baixo, mesmo após 30 minutos de corte. Quanto às ferramentas de PCD, estas apresentam um desgaste bem menor que as anteriores, mesmo depois de 30 minutos de corte.

Sun, Brandt e Mo (2014), num dos seus estudos recentes sobre mecanismos de desgaste de ferramentas de corte, usando pastilhas de metal duro no torneamento da liga Ti-6Al-4V, recorreram à variação média do desgaste da face de saída ( $V_B$ ) e ao desgaste máximo ( $V_{Bmáx}$ ) com o volume de material removido, utilizando as velocidades de corte de 150 e 220 m/min, como mostra a Figura 12. Verificou-se que o aumento do desgaste médio e máximo é gradual e quase linear com o aumento da velocidade de corte, parando os testes após 57,2 e 20,8 cm<sup>3</sup> de material removido, para velocidades de corte de 150 e 220 m/min, respetivamente, uma vez que foi atingido o valor imposto pela norma ISO 3685.



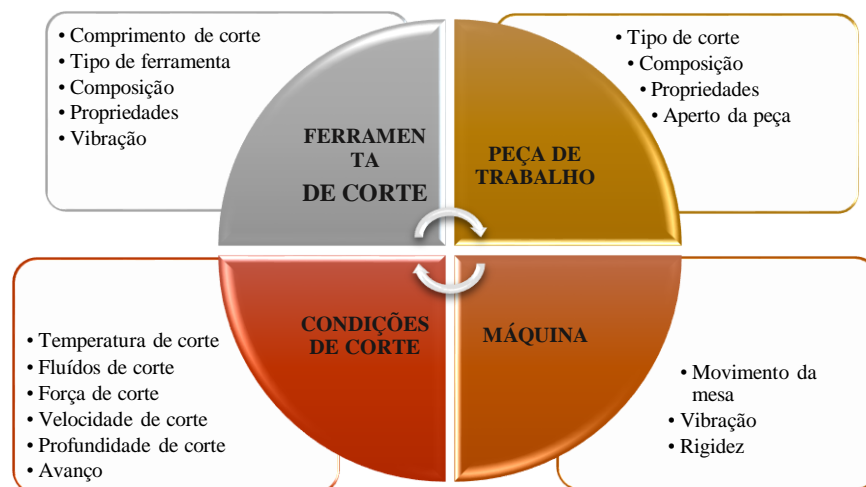
**Figura 12** - Variação do  $V_B$  e  $V_{Bmáx}$  com o volume de material removido para as velocidades de corte de 220 e 150 m/min (Sun, Brandt e Mo, 2014).

Arrazola, Garay e Iriarte (2009), fizeram testes comparativos entre as ligas Ti-6Al-4V e Ti555.3 verificando que o volume de apra removido na liga Ti555.3 é apenas 56% do volume removido na liga Ti-6Al-4V. Na Figura 13 encontram-se os resultados obtidos por estes autores em testes de desgaste de 15 min, com uma ferramenta de carbonetos revestido K15. A aplicação do critério de vida da ferramenta pela norma ISO 3685 revela que, para a maquinagem de Ti-6Al-4V, o desgaste na face de saída é  $V_B = 0,15$  mm, usando uma velocidade de corte de 80 m/min, sendo obtido na face de ataque  $KT = 0,21$  mm. Já na maquinagem de Ti555.3 verificou-se um  $V_B = 0,33$  mm e uma cratera  $KT = 0,18$  mm, para uma velocidade de corte de 50 m/min.



**Figura 13** - Desgaste da face de saída para 15 min de teste com ferramenta K15 (Arrazola, Garay e Iriarte, 2009).

Como verificado ao longo desta secção, o tempo de vida das ferramentas de corte varia consoante inúmeros fatores. A Figura 14 resume esses mesmos fatores que influenciam a vida das ferramentas de corte.



**Figura 14** - Fatores que influenciam a vida das ferramentas de corte [Adaptado de Murthy e Rajendran, 2012].

### 2.3.3 Forças de corte

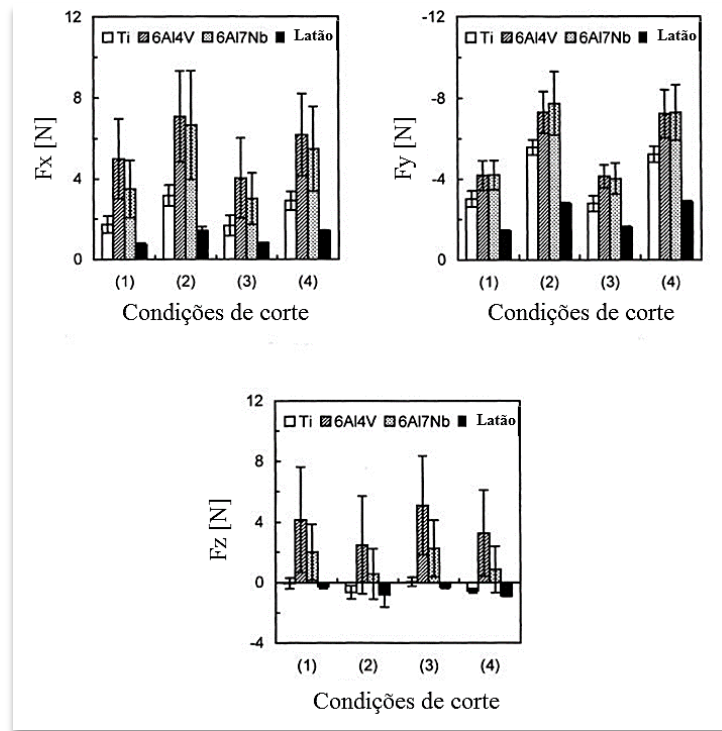
A medição das forças de corte no processo de maquinagem é um ponto crucial na análise da maquinabilidade de materiais. As forças de corte têm uma influência direta em pontos como a concepção de ferramentas de corte e seu desgaste, a análise térmica, a caracterização de apara, a previsão de rugosidade da superfície obtida, entre outros. As forças de corte são também importantes quando multiplicadas pela velocidade de corte, na medida em que determinam a potência requerida no processo de maquinagem, definindo desde logo a potência mínima que a máquina-ferramenta deverá apresentar.

Em torneamento, a força de maquinagem projeta-se sobre a direção de corte ( $F_c$ , ou  $F_z$ ), de avanço ( $F_f$ , ou  $F_y$ ) e de penetramento ( $F_p$ , ou  $F_x$ ), sendo a sua medição realizada geralmente através de dinamómetros.

Na maquinagem do titânio, as forças de corte são geralmente altas, sendo um dos fatores indicativos da baixa maquinabilidade deste metal. Vários autores estudaram, em testes de maquinagem, as forças de corte obtidas em várias ligas de titânio, relacionando os valores obtidos com o aumento da dureza e da resistência mecânica.

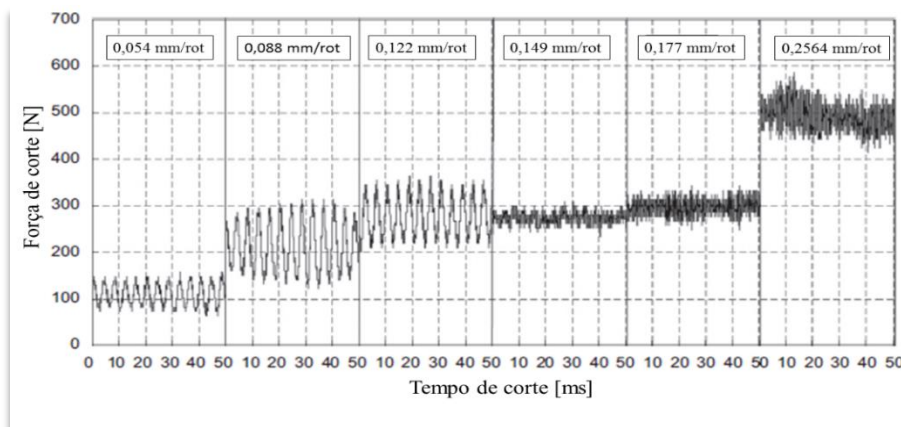
Kikuchi e Okuno (2004), num estudo sobre a maquinabilidade do titânio, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb e latão, obtiveram valores das três componentes da força de maquinagem, Figura 15, experimentando diversas condições de corte. Os resultados revelam que as condições de corte usadas têm influência direta nos valores das forças, sendo que para todas as condições testadas, as ligas de titânio tomam valores mais acentuados em comparação com o latão e titânio puro, sendo no entanto semelhantes entre si. De notar também que para as condições (2) e (4), as forças  $F_p$  e  $F_f$  são maiores, o que significa um aumento das forças com o aumento da profundidade de corte.

Sun, Brandt e Dargusch (2009) estudaram o comportamento da liga Ti-6Al-4V na operação de torneamento, caracterizando esta quanto às forças de corte e formação de apara. Concluíram que a força de corte geralmente aumenta com o aumento do avanço, observando no entanto uma quebra da força de corte no intervalo de 0,122-0,149 mm/rot de avanço, como mostra a Figura 16. Isto deve-se, segundo os autores, à vibração da ferramenta em avanços inferiores, causando forças de corte maiores.



Condição	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Profundidade de corte [mm]
1	28	0,02	0,2
2	28	0,02	0,4
3	56	0,02	0,2
4	56	0,02	0,4

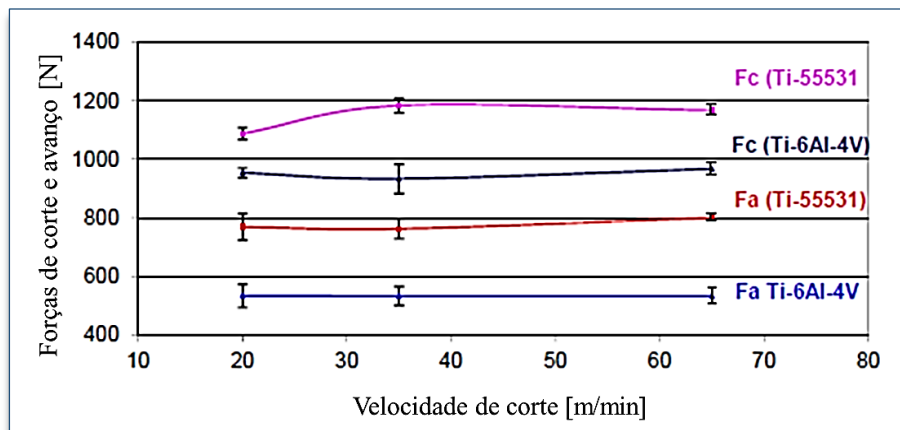
**Figura 15** - Força de corte dos metais em estudo para diferentes condições de corte (Kikuchi e Okuno, 2004).



**Figura 16** - Força de corte em função do avanço (Sun, Brandt e Dargusch, 2009).

Nouari e Makich (2014) testaram a maquinabilidade das ligas Ti-6Al-4V e Ti-55531 na operação de fresagem, usando uma ferramenta de corte com ângulo de ataque nulo e avanço

de 0,1 mm/rot, onde observaram que a força de corte ( $F_c$ ) é a componente de força dominante nas forças de maquinagem, Figura 17. Neste estudo, a força de avanço manteve-se estável em todas as condições de corte, podendo-se ainda verificar que existe uma estabilização das forças para velocidades de corte mais altas (35 m/min e 65 m/min). No entanto, houve um ligeiro aumento da força de corte na liga Ti-55531, quando a velocidade de corte aumenta a partir de 20 m/min até 65 m/min.



**Figura 17** - Ilustração das forças de corte ( $F_c$ ) e avanço ( $F_f$ ) em função da velocidade de corte para a liga Ti-6Al-4V e Ti-55531 (Nouari e Makich, 2014).

#### 2.3.4 Rugosidade / Precisão dimensional

O estudo da maquinabilidade de um material por vezes é realizado segundo a sua integridade superficial, sendo efetuadas análises à sua superfície depois de maquinada. Isto deve-se essencialmente ao facto de a qualidade da superfície ser vital aquando do seu emprego em aplicações de maior responsabilidade. De entre todos os parâmetros analisados, destacam-se a rugosidade da superfície, textura, dureza, tensões residuais e microestrutura (Pervaiz *et al.*, 2014).

Em processos de obtenção de peças por maquinagem, e quando essas peças necessitam de um acabamento superficial elevado por forma a serem funcionais, é normal o recurso à medição da rugosidade superficial, uma vez que só assim se poderá viabilizar, ou não, a funcionalidade dessa mesma peça. Em peças com propriedades de retenção de lubrificantes, atrito entre partes em contacto ou capacidade de carga em rolamentos, a rugosidade superficial torna-se por si só determinante.

O rugosímetro é o aparelho de medição da rugosidade superficial mais utilizado, sendo que os parâmetros avaliados são, geralmente, a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) e a amplitude máxima da rugosidade ( $R_t$ ) (Davim, 2008).

Em geral, a literatura mostra que o aumento da velocidade de corte, bem como o uso de fluído, reduz os defeitos obtidos nas superfícies maquinadas. Muitos autores têm mostrado

que quando se usam condições de corte mais severas, como grandes avanços e profundidades, e em especial o uso de ferramentas desgastadas, surgem maiores danos na superfície (Hughes, 2006).

A influência dos parâmetros de maquinagem no acabamento superficial é notória através das expressões teóricas 2 e 3, que expressam a amplitude máxima da rugosidade ( $R_{tt}$ ) em  $[\mu\text{m}]$ , e a rugosidade média aritmética ( $R_{ta}$ ), em  $[\mu\text{m}]$ , respetivamente.

$$R_{tt} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \times 1000 \quad (2)$$

$$R_{ta} = \frac{f^2}{32r_\epsilon} \times 1000 \quad (3)$$

em que  $f$  é o avanço  $[\text{mm/rot}]$  e  $r_\epsilon$  o raio de ponta da ferramenta, em  $[\text{mm}]$ .

Dado que a precisão dimensional está interligada diretamente com o acabamento superficial, ela pode ser relacionada com a rugosidade média aritmética através da seguinte expressão empírica:

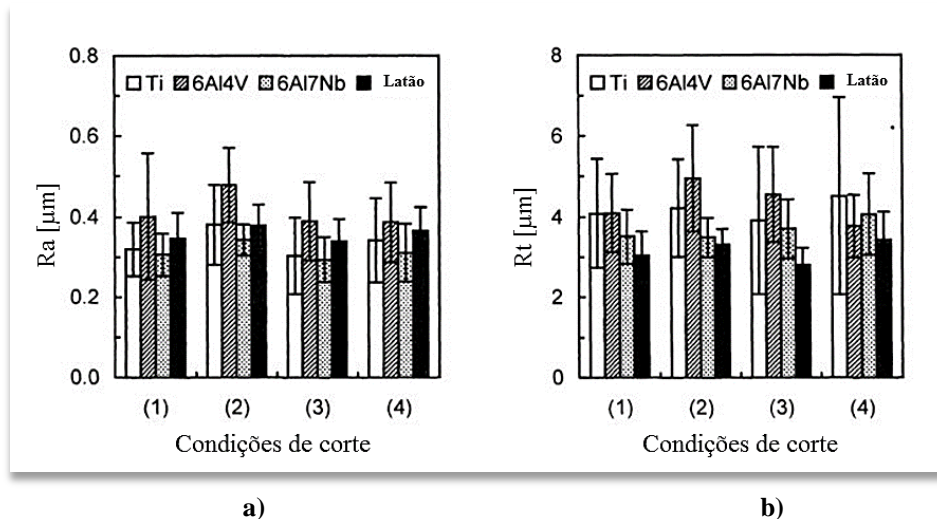
$$IT \approx 30 \times Ra \quad (4)$$

sendo que a informação obtida pela equação 4 é bastante importante na fase de projeto de um produto.

Tal como noutros metais, na maquinagem do titânio e suas ligas existe a preocupação de obter o melhor acabamento superficial condizente com o fim pretendido, havendo por isso desenvolvimentos na investigação com o objetivo de otimizar as condições de corte e assim obter um bom acabamento superficial.

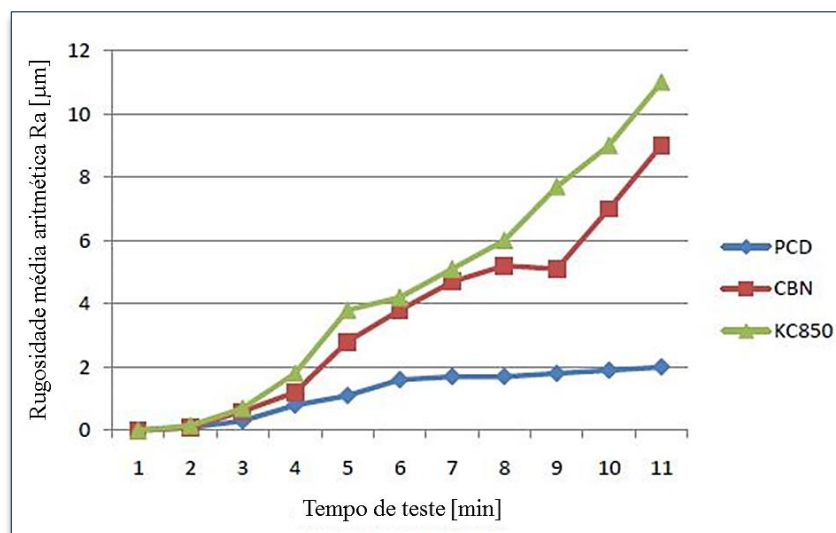
Kikuchi e Okuno (2004), num estudo sobre a maquinabilidade de diferentes ligas, estudaram o acabamento da superfície de corte resultante da maquinagem da liga Ti-6Al-7Nb. Concluíram que não existiam diferenças significativas na rugosidade da superfície para as condições de corte experimentadas, Figura 18. Uma vez que o acabamento superficial é influenciado não só pelo material a maquinar, mas também pelo raio de ponta da ferramenta, o desgaste da mesma e a rigidez do sistema, estes fatores sobrepuseram-se à variação das condições de corte.





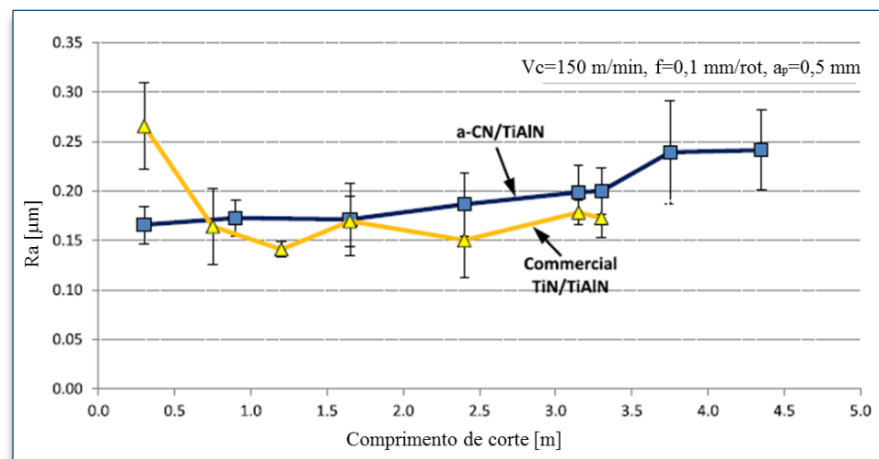
**Figura 18** - Acabamento superficial para diferentes condições de corte: a) Ra e b) Rt (Kikuchi e Okuno, 2004)

Levando em linha de conta o material das ferramentas de corte, Nabhani (2001) realizou um ensaio comparativo entre três ferramentas de corte, em torneamento. Mostrou que com as ferramentas de PCD é obtido um melhor acabamento superficial quando em comparação com as de CBN e carbonetos revestidos, tendo este último apresentado os piores resultados. A elevada rugosidade obtida pelas ferramentas de CBN e carbonetos revestidos é explicado pelo autor com a elevada taxa de desgaste. Na Figura 19 apresentam-se os resultados da rugosidade média aritmética, obtida para as três ferramentas usadas no estudo.



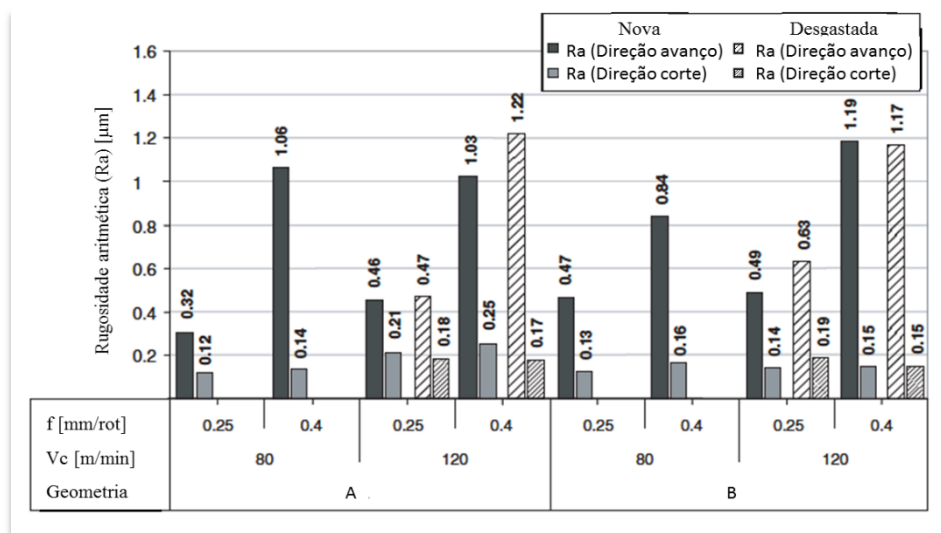
**Figura 19** - Rugosidade média aritmética obtida no Ti5Al4Mo2Sn6Si2F com três ferramentas de corte (Nabhani, 2001).

Çalışkan e Küçükköse (2015) estudaram recentemente o efeito de diferentes revestimentos das ferramentas de corte na maquinabilidade da liga Ti-6Al-4V. Analisando a integridade superficial no processo de fresagem, relativamente à rugosidade superficial, concluíram que para diferentes revestimentos das ferramentas, os valores de acabamento superficial foram semelhantes. Concluíram ainda que o desgaste da ferramenta de corte tem pouca influência no acabamento superficial, existindo no entanto um aumento de cerca de 20% do valor da rugosidade quando a ferramenta entra na fase de falha (após 3,15 m de corte), Figura 20.



**Figura 20** - Rugosidade superficial na maquinagem da liga Ti-6Al-4V (Çalışkan e Küçükköse, 2015).

Hughes (2006), em conclusão de testes de torneamento da liga Ti-6Al-4V, revelou que um aumento do avanço produziu uma maior tendência para o aumento da rugosidade superficial, como esperado. Os testes foram realizados para diferentes velocidades de corte e avanço, mantendo a profundidade de corte em 0,25 mm, Figura 21. Analisando a rugosidade superficial para ferramentas novas e desgastadas, concluiu ainda que estas últimas têm influência no aumento da rugosidade superficial, minimizando esse efeito quando se usam pastilhas de corte arredondadas (geometria B), em detrimento daquelas com estilo afiado (geometria A).



**Figura 21** - Valores da rugosidade superficial em função do avanço, velocidade de corte e geometria das ferramentas de corte (Hughes, 2006).

Na indústria biomédica, a rugosidade na zona funcional das próteses e componentes biomédicos torna-se um aspeto fulcral para um correto funcionamento dos mesmos. Perante isto, Mattei *et al.* (2011) definiram valores da rugosidade Ra, de diferentes materiais, como os necessários para o correto funcionamento de uma articulação artificial, como mostra a Tabela 7.

**Tabela 7** – Rugosidade média aritmética (Ra) dos principais materiais utilizados na zona funcional da articulação artificial (Mattei *et al.*, 2011).

Material	Ra [μm]
<b>Polietileno (UHMWPE)</b>	0,1 – 2,5
<b>Aço inoxidável</b>	0,01 – 0,05
<b>Liga CoCrMo</b>	≈0,001

## 2.4 SÍNTESE

Ao longo deste capítulo o titânio foi descrito como um material de difícil maquinabilidade, apresentando um baixo índice. De forma a suportar esta afirmação, foram enumerados vários fatores, que vão desde a afinidade química com as ferramentas de corte, a elevada temperatura na zona de corte, o encruamento ou as tensões residuais elevadas.

Os trabalhos experimentais na área da maquinagem debruçam-se sobretudo na análise do tipo e forma das aparas, vida das ferramentas, acabamento superficial e forças de corte. Perante isto, na Tabela 8 é feita uma síntese de vários estudos recentes sobre estes fatores nas ligas de titânio.

**Tabela 8** - Resultados obtidos para o  $V_B$ , forças de corte e  $R_a$  na maquinagem de diferentes ligas de titânio, por diversos autores.

Autor	Material	Parâmetros de corte	$V_B$	Forças de corte	$R_a$
Çalışkan e Küçükköse (2015)	Ti6Al4V	$V_c=150$ m/min $f=0,1$ mm/rot $a_p=0,5$ mm	$V_{Bmáx}=0,30$ para 3,8 m de comprimento de corte	$F_{máx}=565$ N	$R_a=0,20$ $\mu$ m para 3,15 m de corte
Gao <i>et al.</i> (2015)	Ti6Al4V	$V_c=100$ m/min $f=0,5$ mm/rot $a_p=0,5$ mm	$V_{Bmáx}=0,25$ mm para 20 cm <sup>3</sup> de material removido	$F_{máx}=920$ N	-
Wang, Nakashima e Larson (2014)	Ti6Al4V	$V_c=58,1$ m/min $f=0,1$ mm/rot $a_p=0,6$ mm	-	$F_{máx}=500$ N	
Muhammad <i>et al.</i> (2014)	Ti-6246	$V_c=10$ m/min $f=0,1$ mm/rot $a_p=0,2$ mm	-	$F_{máx}=65$ N	$R_a=0,82$ $\mu$ m
Liu <i>et al.</i> (2013)	Ti6Al4V	$V_c=120$ m/min $f=0,15$ mm/rot $a_p=1$ mm	-	$F_{máx}=328$ N	$R_a=0,28$ $\mu$ m
Sun, Brandt e Dargusch (2009)	Ti6Al4V	$V_c=75$ m/min $f=0,122$ mm/rot $a_p=1,5$ mm	-	$F_{máx}=350$ N	-
Hughes (2006)	Ti6Al4V	$V_c=120$ m/min $f=0,4$ mm/rot $a_p=0,25$ mm	$V_{Bmáx}=0,30$ mm para 50 min de corte	-	$R_a=0,25$ $\mu$ m
Nabhani (2001)	TA48	$V_c=75$ m/min $f=0,25$ mm/rot $a_p=1$ mm	$V_{Bmáx}=0,25$ mm para 11 min de corte	-	$R_a=2$ $\mu$ m para 5 min de corte

Da análise da Tabela 8, e recorrendo a toda a informação presente no capítulo 2, é possível verificar que a maioria dos testes são realizados na liga Ti-6Al-4V. Perante isto, e uma vez que novos materiais são lançados a cada dia, é necessária uma gama abrangente de testes procurando assim os melhores parâmetros de corte. Surge então a necessidade de realização de ensaios de maquinagem na liga Ti6Al7Nb, uma vez que esta carece de falta de informação na literatura, sendo no entanto cada vez mais empregue na área biomédica. É de salientar que com o estudo desta liga, é pretendido obter dados sobre o desgaste de ferramentas de corte, forças e rugosidades e ainda saber qual o comportamento desta liga perante o sistema de lubrificação MQL, visto ser uma técnica relativamente nova e com o objetivo direcionado para a maquinagem sustentável.

---

# Capítulo 3

---

Metodologia experimental

---



### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as condições utilizadas nos ensaios de maquinagem, o material utilizado e sua forma, o planeamento dos ensaios, a especificação das ferramentas utilizadas, os parâmetros de maquinagem, bem como os critérios de análise a que se recorreu para a avaliação. Desta forma, pretende-se facilitar a compreensão da metodologia utilizada e assim possibilitar a reprodução deste processo, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Todos os procedimentos experimentais foram realizados no laboratório de tecnologia mecânica e no Laboratório de Maquinagem e Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro (UA).

#### 3.1 MATERIAL ENSAIADO

O material utilizado nos ensaios experimentais foi a liga de titânio Ti6Al7Nb, fornecida pela empresa *TiFast S.R.L.* (Itália). A sua composição química bem como as características mecânicas estão descritas nas Tabela 9 e 10, respetivamente. Em anexo (Anexo I), é apresentado o certificado do material fornecido pela empresa.

**Tabela 9** - Composição química da liga Ti6Al7Nb utilizada nos ensaios (*Tifast S.R.L.*).

Elemento químico (%)	Al	C	Fe	H	N	Nb	O	Ta
Máximo	6,02	0,013	0,16	0,003	0,005	6,83	0,178	0,05
Mínimo	5,94	0,013	0,15	0,003	0,005	6,90	0,169	0,05

Os elementos estabilizadores Al e Nb são os que têm maior percentagem de elementos constituintes, fazendo prevalecer as suas características intrínsecas nas características globais desta liga.

**Tabela 10** - Características físicas e mecânicas da liga Ti6Al7Nb utilizada nos ensaios (*Tifast S.R.L.*).

Características físicas e mecânicas	Valor
Tensão Nominal Máxima	995 MPa
Tensão Limite de Elasticidade	910 MPa
Coefficiente de estrição	49,6%
Extensão após rutura	12,4%
Microestrutura	Alfa-Beta Globular

Caracterizando-se pela sua empregabilidade na área médica, a liga em estudo apresenta, comparativamente com o titânio no estado puro, uma resistência quatro vezes superior, aproximadamente, o que torna favorável o seu uso em aplicações de grande exigência.

O material foi disponibilizado sob a forma de varão, com 28 mm de diâmetro, onde daí foram cortados vários provetes com comprimento de 120 mm, como mostra a Figura 22. Em cada provete foi realizado o facejamento dos topos, bem como a sua furação, de modo a criar o apoio para o uso de contraponto.



**Figura 22** - Provette utilizado nos ensaios.

### 3.2 FERRAMENTAS DE CORTE

A pastilha de corte utilizada neste trabalho pertence ao grupo dos metais duros, sem substrato, com referência VNMG 160404-QM H13A (ver Anexo V), da Sandvik Coromant<sup>1</sup>, em que para a sua fixação foi usado o porta ferramentas DVJNL 2020K16, com fixação da pastilha por grampo, Figura 23.

A escolha desta geometria de ferramenta de corte foi baseada na informação do fabricante. As ferramentas com ângulo de saída 0° oferecem um maior número de arestas de corte, o que reduziria o investimento com as ferramentas, para além da alta resistência da aresta. Neste sentido, é indicada para condições de corte pesadas, uma vez que na indústria biomédica o fabrico de implantes médicos ou próteses, por exemplo, podem envolver corte interrompido. Já um ângulo de inclinação negativo, para além de recomendado pelo fabricante, foi escolhido para que a apanha corresse para o lado não maquinado, tentando preservar a rugosidade obtida no corte. Outro aspeto foi o ângulo de ponta menor, que oferece maior acessibilidade, menores forças de corte e vibração (Sandvik Coromant, 2012).

---

<sup>1</sup> <http://www.sandvik.coromant.com>





a)



b)



c)

**Figura 23** - Ferramenta de corte utilizada nos ensaios: a) pastilha VNMG 160404-QM H13A, b) fixação da pastilha por grampo, c) porta-ferramentas DVJNL 2020K16, cortesia Sandvik.

Na Tabela 11 apresenta-se a geometria da ferramenta utilizada tal como a norma ISO, utilizada pela empresa que a fornece.

**Tabela 11** - Identificação e geometria da ferramenta utilizada nos ensaios.

Ferramenta	ISO	Ângulo de posição $\chi$ ( $^{\circ}$ )	Ângulo de inclinação $\lambda_s$ ( $^{\circ}$ )	Raio de curvatura da ponta $r_{\epsilon}$ (mm)	Ângulo de saída $\alpha$ ( $^{\circ}$ )
S15	Sandvik VNMG 160404-QM H13A	93	-13	0,4	0

A pastilha S15 de metal duro foi utilizada em todos os testes realizados. Esta caracteriza-se pela boa resistência ao desgaste por abrasão e tenacidade, no torneamento em desbaste, à maquinagem média para ligas de titânio e aços resistentes ao calor, uma vez que pertence à classe H13A (Sandvik Coromant, 2012). De notar também a presença de quebra-aparas na própria pastilha, o que facilitará a expulsão da aparas.

### 3.3 MÁQUINA-FERRAMENTA

Na elaboração dos ensaios práticos utilizou-se o Torno CNC Kingsbury MHP 50 com 18 kW de potência e rotação máxima de 4500 rpm, Figura 24. Este possui um comando numérico FANUC, bucha de aperto hidráulico para peças até 200 mm de diâmetro e uma torreta com capacidade de armazenamento até 12 ferramentas, possibilitando ainda o uso de contraponto. Outras características intrínsecas ao torno CNC usado estão descritas em anexo (Anexo II).



**Figura 24** - Torno CNC Kingsbury MHP 50 utilizado nos ensaios.

### 3.4 PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Os parâmetros de corte utilizados foram definidos baseando-se no catálogo do fabricante das pastilhas, delineando assim os valores de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte mais convenientes para o material em questão. Foi tido em conta também a obtenção de uma qualidade superficial boa, pretendendo ainda uma vida longa da ferramenta de corte, tornando o processo economicamente viável.

De seguida são descritos todos os parâmetros de corte utilizados nos ensaios da liga Ti6Al7Nb, divididos em ensaios curtos, Tabela 12, e longos, Tabela 13, sendo eles ilustrados e explicados mais à frente.

**Tabela 12** - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios curtos.

ENSAIOS CURTOS			
Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Profundidade de corte [mm]	Tipo de lubrificação
30	0,05	0,25	Seco/MQL
	0,1		
	0,05	0,5	
	0,1		
60	0,05	0,25	Seco/MQL
	0,1		
	0,05	0,5	
	0,1		
90	0,05	0,25	Seco/MQL
	0,1		
	0,05	0,5	
	0,1		
120	0,05	0,25	Seco/MQL
	0,1		
	0,05	0,5	
	0,1		

**Tabela 13** - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos.

ENSAIOS LONGOS			
Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/rot]	Profundidade de corte [mm]	Tipo de lubrificação
30	0,1	0,5	Seco
	0,3		
	0,1	0,5	MQL
90	0,1	0,5	Seco
		1	

#### 3.4.1 Estratégia de corte

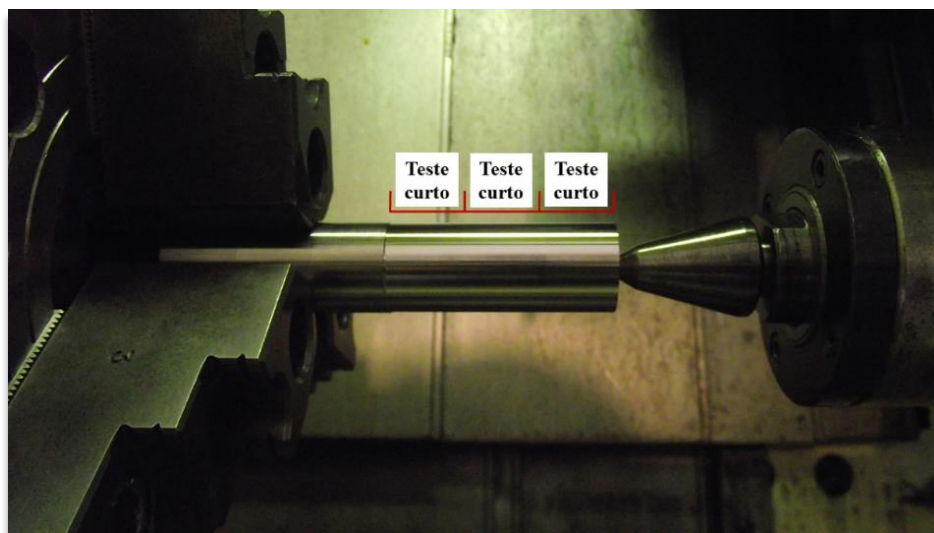
Nesta secção é abordada a estratégia de corte adotada nos ensaios, sendo que se optou pela realização de testes curtos, com o objetivo de avaliar principalmente a apara obtida, a rugosidade da superfície e as forças de corte, e testes longos, onde a medição da vida da ferramenta de corte era o fator com maior destaque.

Numa fase inicial foi realizada uma passagem de corte ao longo de todo o comprimento do provete de forma a tornar o seu diâmetro igual em todos os pontos e com valor de 28 mm. Sendo o comprimento dos provetes de 120 mm em todos os testes, sejam eles curtos ou

longos, apenas foi maquinado metade do mesmo em cada passagem da pastilha, ou seja 60 mm, o que tornaria o provete capaz de ser maquinado de ambos os lados.

Em todos os ensaios recorreu-se ao uso de contraponto, o que aumentou a segurança do teste, assim como a diminuição de vibrações, tornando os testes mais fidedignos. A norma ISO 3685/1993 recomenda o uso de contraponto na realização dos ensaios, citando ainda que o rácio entre o comprimento do provete em flexão e o diâmetro não deverá ser maior do que 10, diminuindo com isto a ocorrência de vibrações.

Os ensaios de corte curtos foram realizados de acordo com a Figura 25.



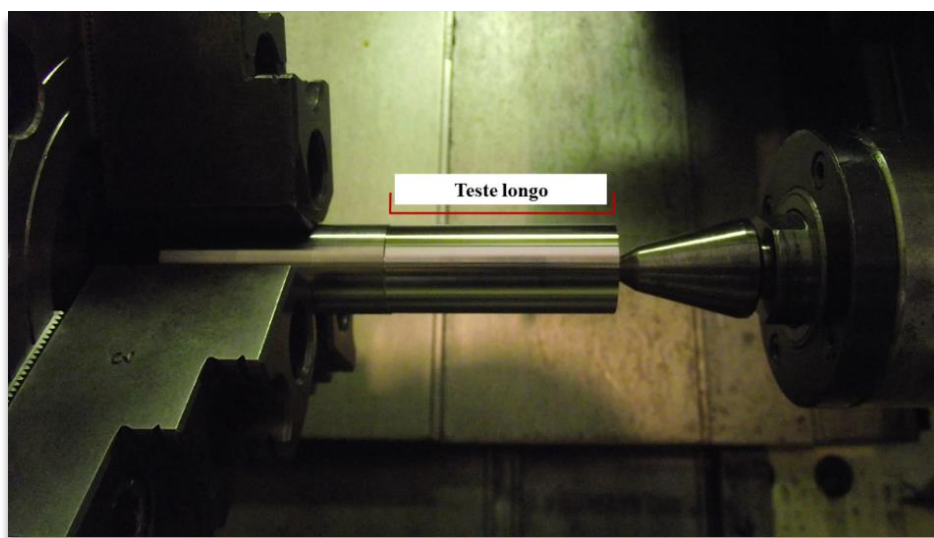
**Figura 25** - Identificação dos testes curtos no provete de ensaios.

O comprimento do provete a maquinar foi de 60 mm, dividido de igual forma em três pistas, identificadas na Figura 25. Realizadas de uma forma sequencial, foram percorridas várias etapas em que a primeira se dava com a definição e pré-programação no torno CNC de uma velocidade de corte e avanço, apresentadas na Tabela 12. A ferramenta percorria toda a primeira pista. Atingida a sua extremidade, a ferramenta subia para uma zona de segurança e a bucha parava a rotação. Depois de percorrida cada pista foi retirada a apara obtida para posterior análise, assim como ao longo do teste era realizada a medição das forças de corte. Após a conclusão da primeira pista era realizada a mesma metodologia na segunda pista. O procedimento descrito foi utilizado também na terceira pista, até se dar a conclusão dos testes. De notar que foram repetidos três vezes, sempre de uma forma aleatória.

Após a conclusão das três pistas descritas, procedeu-se à medição da rugosidade da superfície para os parâmetros testados, sendo depois o provete colocado de novo no torno, ficando assim disponível para maquinar a segunda metade do provete, evitando grandes variações de diâmetro na zona de aperto na bucha e zona de teste.

Por fim, salientar que os ensaios curtos foram realizados a seco e com MQL, usando pastilhas novas primeiro ( $V_B < 0,03$  mm), sendo repetidos no final com pastilhas desgastadas ( $V_B > 0,2$  mm). Quanto à profundidade de corte, primeiro realizaram-se todos os testes referentes à profundidade de 0,5 mm e de seguida os de 0,25 mm.

No que toca a ensaios longos, estes são descritos na Figura 26.



**Figura 26** - Identificação dos testes longos no provete de ensaios.

Uma vez que o objetivo principal dos testes longos difere dos ensaios curtos, já que se pretende determinar o tempo de vida da ferramenta, foi usado o comprimento total da metade do provete em cada passagem da ferramenta, ou seja 60 mm. Nos testes de corte longos, a ferramenta apenas é deslocada para uma zona de segurança depois de percorridos os 60 mm do provete. Quanto à pré-programação do torno com as velocidades de corte e avanço pretendidos, estes regem-se pelo descrito na Tabela 13.

Dada a primeira passagem da ferramenta no provete, é retirada a pastilha de corte do porta-ferramentas e analisado o seu desgaste ao microscópio ótico, sendo de seguida novamente colocada e realizada nova passagem e nova análise de desgaste, até se perfazer o critério de vida estipulado. Nos testes longos, o provete era rodado depois de uma passagem, tal como acontecia nos ensaios curtos, tudo pelos mesmos motivos.

Nos ensaios longos os testes foram realizados a seco, sendo que apenas um dos descritos na Tabela 13 foi realizado com lubrificação MQL, para posterior comparação do desgaste da pastilha em função do tempo de corte. De notar ainda que numa primeira fase foram realizados os ensaios com profundidade de corte de 0,5 mm, e só de seguida o que apresentava 1 mm de profundidade, para a velocidade de corte de 90 mm/min.

### 3.5 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA MAQUINABILIDADE UTILIZADOS

Neste tópico são descritos cada um dos métodos utilizados para a avaliação da maquinabilidade do material em estudo, assim como os parâmetros de avaliação usados em cada um desses métodos.

#### 3.5.1 Caracterização da apara

A apara obtida na maquinagem depende, entre outros fatores, do material a maquinar, ferramenta e parâmetros de corte e tipo de lubrificação, tal como descrito no capítulo 2 da presente dissertação.

A caracterização da apara é realizada segundo a norma ISO 3685/1993 que suporta esta matéria, Figura 27. Esta norma qualifica a apara resultante do processo de maquinagem quanto à forma e tipo, sendo dividida em várias categorias.

1. Em fita	2. Tubular	3. Espiral	4. Helicoidal em gume	5. Helicoidal Cônica	6. Em arco	7. Em lasca	8. Em agulha
1.1. Longa	2.1. Longa	3.1. Plana	4.1. Longa	5.1. Longa	6.1. Ligada		
1.2. Curta	2.2. Curta	3.2. Cônica	4.2. Curta	5.2. Curta	6.2. Fragmento		
1.3. Enrolada	2.3. Enrolada		4.3. Enrolada	5.3. Enrolada			

**Figura 27** – Classificação da apara, segundo a norma ISO 3685/1993.

Dado o leque abrangente de parâmetros de corte utilizados na maquinagem da liga Ti6Al7Nb, a forma e tipo de aparas foi também ela diferente consoante os parâmetros. Todas elas foram classificadas com base na norma ISO descrita acima. Para além da classificação segundo esta norma, foi ainda avaliada em microscópio a apara, para assim averiguar a presença, ou não, da forma serrilhada geralmente apresentada neste tipo de metais.

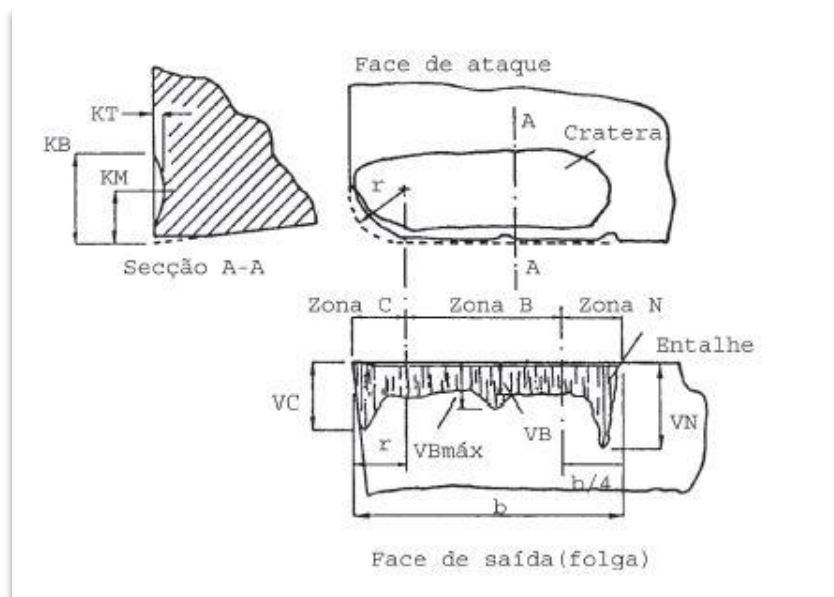


### 3.5.2 Medição do desgaste da ferramenta de corte

Sendo o custo das pastilhas de corte usadas na maquinagem um fator económico relevante no aumento do preço de fabrico, é importante avaliar corretamente o desgaste das pastilhas, determinando o momento certo para a sua substituição.

Segundo a norma ISO 3685/1993, o desgaste é avaliado geralmente na face de saída e na face de ataque da ferramenta de corte. A medição na face de saída não é regular ao longo do comprimento da aresta, sendo quantificada geralmente através de três parâmetros:  $V_C$ ,  $V_B$  e  $V_{Bmáx}$ , Figura 28. O primeiro é definido como o desgaste junto ao raio de curvatura da ferramenta, já o segundo e o terceiro são o desgaste médio e máximo na face de saída, respetivamente. Quanto ao desgaste na face de ataque, esta toma em consideração a profundidade máxima da cratera, sendo medido o valor  $K_T$  correspondente.

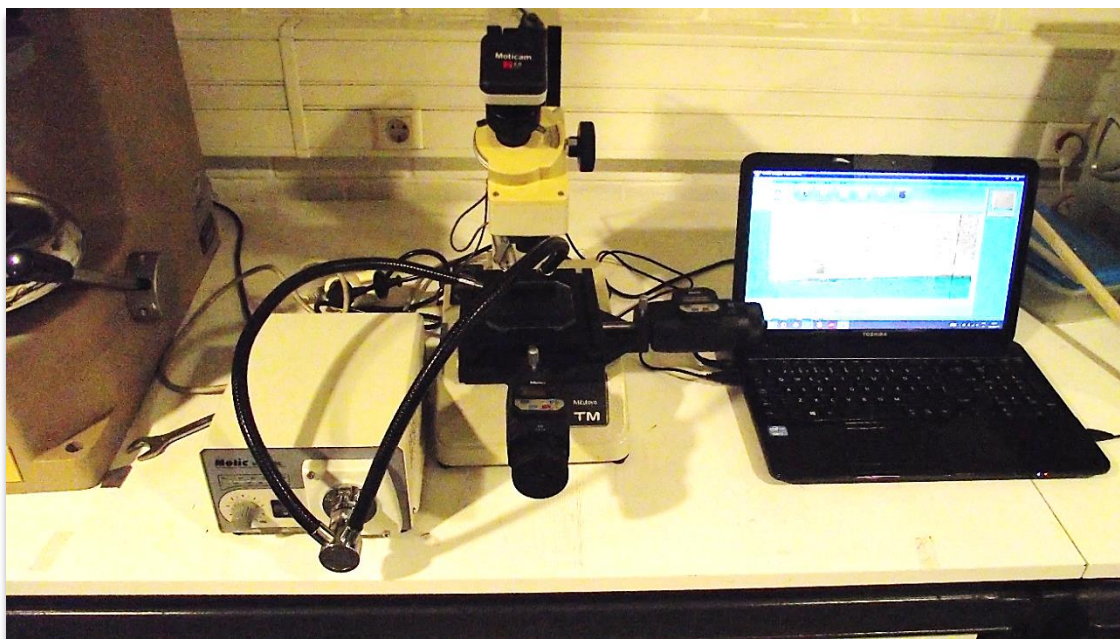
Na prática corrente da investigação académica, a medição do desgaste da ferramenta de corte é realizada através da obtenção do valor de  $V_{Bmáx}$ , uma vez que é de fácil medição no microscópio, ao passo que o valor de desgaste na face de ataque é de mais difícil quantificação, visto ser um valor de profundidade.



**Figura 28** - Medição do desgaste na face de ataque e saída das pastilhas de corte, segundo a norma ISO 3685/1993.

No presente trabalho experimental, a medição do desgaste nas ferramentas de corte foi realizado para cada um dos parâmetros descritos na Tabela 13. Por cada passagem da ferramenta no provete, em cada parâmetro pré-programado, era realizada na pastilha de corte a medição do seu desgaste na face de saída de uma forma contínua, até se atingir o critério de paragem estabelecido,  $V_{Bmáx} = 0,2$  mm, com recurso ao microscópio ótico Mitutoyo TM 510, presente no Laboratório de Maquinagem e Tribologia.

Associado ao microscópio, foi acoplado um sistema digital que incorpora uma câmara Motic CMOS com o modelo Motacam 2.0 e um sistema de iluminação também ele Motic, com o modelo MLC – 150. Através deste sistema digital, foi possível fazer a ligação a um computador, incorporado com o *software* Motic Images Plus 2.0, onde a medição do desgaste da pastilha tornou-se de fácil quantificação. A Figura 29 mostra o microscópio utilizado, assim como todo o sistema digital incorporado.



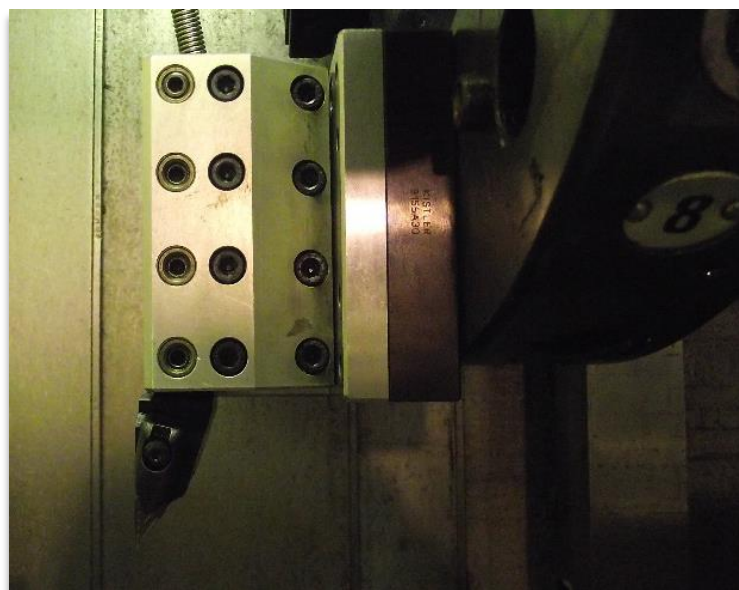
**Figura 29** - Microscópio ótico usado na medição do desgaste das ferramentas, incorporado com o sistema de iluminação e *software* Motic Images Plus 2.0.

Depois de analisado o desgaste das ferramentas de corte no microscópio, onde foi utilizada uma ampliação de 30X, e retirados os valores de desgaste na face de saída ao longo do tempo de corte, recorreu-se ao conhecido modelo de Taylor, usando como parâmetro de entrada a velocidade de corte para a determinação da vida da ferramenta, Equação 1.

### 3.5.3 Forças de corte

Parâmetro importante na quantificação da potência requerida pela máquina-ferramenta, assim como na vida da ferramenta e acabamento superficial, as forças de corte foram adquiridas através de um dinamómetro piezoelétrico com o modelo 9121, da Kistler, Figura 30 a). Depois de adquirido o resultado das forças, foi usado um amplificador de sinal de modelo 5019B e o *software* Dynoware, que permitiu a sua interação com o computador, Figura 30 b). Na aquisição de sinal foi usada uma frequência de amostragem de 150 Hz, em que o tempo de amostragem foi definido de forma manual em 150 segundos.





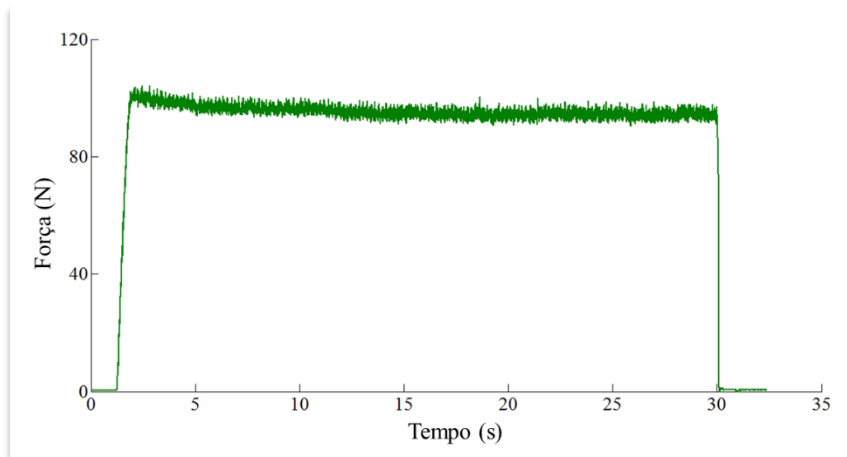
a)



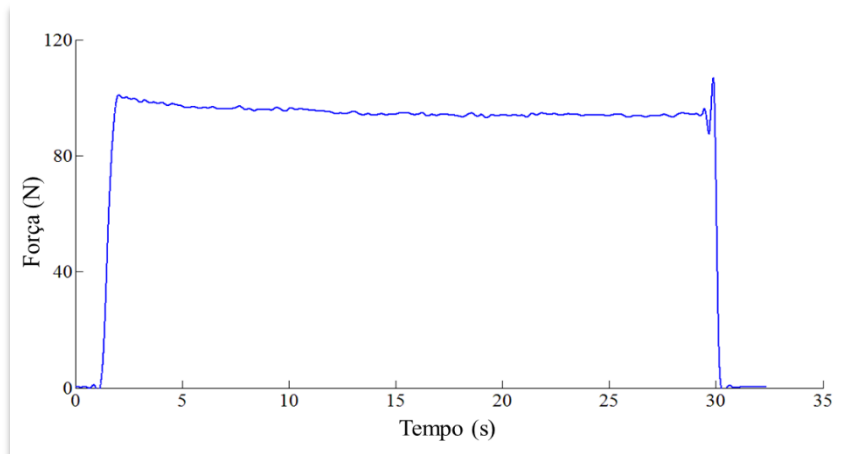
b)

**Figura 30** - Medição das forças de corte: a) dinamômetro piezoelétrico 9121, b) amplificador de sinal 5019B.

Inerente ao processo de aquisição de sinal está o ruído. Este faz com que os sinais adquiridos possam ser influenciados por uma gama de frequência que não é de interesse na análise, sendo necessário o seu tratamento. Para isso foi usada a Transformação Wavelet, técnica de análise para o processamento de sinal, em que a análise é realizada no domínio de tempo-frequência (Lauro *et al.*, 2014). A Figura 31 retrata o uso da Transformação Wavelet no tratamento de sinais adquiridos.



a)



b)

**Figura 31** - Sinal adquirido: a) com ruído, b) sem ruído, usando a Transformação Wavelet.

#### 3.5.4 Medição da rugosidade superficial

Tal como descrito no capítulo 2, a rugosimetria é uma das técnicas mais vulgarmente utilizadas na caracterização de uma superfície, sendo também um parâmetro de caracterização da maquinabilidade de um dado material.

Por forma a caracterizar a rugosidade superficial, foi utilizado o rugosímetro de agulha de diamante Hommel Tester T1000E, Figura 32 a), sendo os seus dados obtidos em computador, utilizando o *software* Turbo Datawin, Figura 32 b).



a)



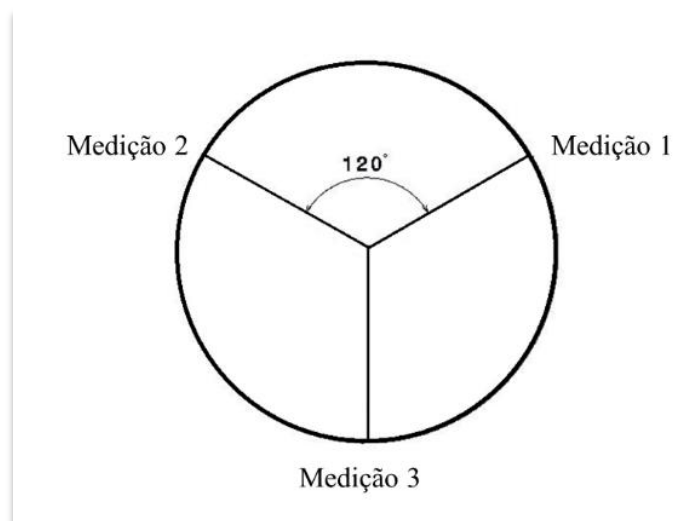
b)

**Figura 32** - Medição da rugosidade: a) representação do rugosímetro em medição, b) representação do rugosímetro e ligação ao *software* utilizado.

A medição da rugosidade da peça maquinada foi efetuada, para todos os testes, depois da superfície ter sido limpa com ar comprimido à temperatura ambiente. Foi realizada a medição em três pontos distintos do provete deslocados de  $120^\circ$ , Figura 33, para cada parâmetro de corte utilizado. Levando em linha de conta a baixa rugosidade necessária para o correto funcionamento de articulações artificiais, e por forma a melhorar a compreensão

de rugosidade da superfície, foi usado um cut-off ( $L_c$ ) de 0,8 mm para todos os testes, e um comprimento total de palpagem ( $L_t$ ) igual a 4,8 mm.

Na pré-programação do rugosímetro foram selecionados, para além do  $L_c$  e  $L_t$ , os parâmetros de amplitude desejados, sendo eles o  $R_a$  e  $R_t$ .

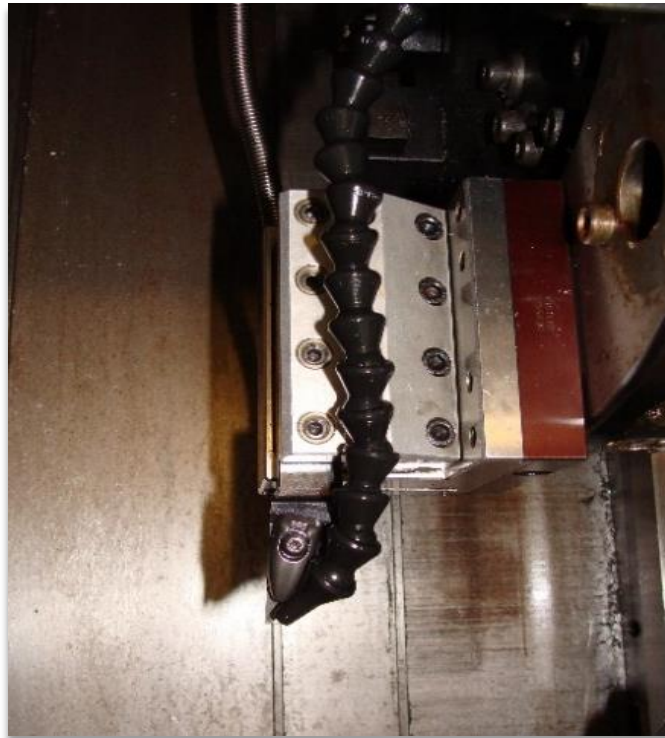


**Figura 33** - Esquema de medição da rugosidade ao longo do provete de ensaio.

### 3.6 MAQUINAGEM SUSTENTÁVEL

Como resultado de uma maquinagem sustentável, conhecida também por “*green machining*”, foram usados em alguns ensaios, descritos na Tabela 12 e Tabela 13, refrigeração por MQL, em detrimento da usual refrigeração por emulsão ou fluído de corte abundante. Este facto tem como principal objetivo avaliar as alterações ao nível de forças e rugosidade que o material apresentava, comparado com os outros tipos de refrigeração, ou quando maquinado a seco.

Foi então usado um equipamento de MQL da UNIST, Figura 34, sendo o fluído incorporado Coolube 2210, 100% natural e biodegradável. Usou-se uma pressão de ar comprimido de 4 bar e um caudal de fluído de 2,6 mL/min. Este sistema MQL usado, aplica o fluído de corte através de um aerossol externo, ou seja, o fluído é aplicado fora da ferramenta de corte, como mostra a Figura 34 a). Este modo de aplicação do fluído de corte tem como principais vantagens a fácil implementação e ainda um baixo preço, sendo que por outro lado o equipamento pode ser trocado de máquina para máquina. No entanto, este tipo de mecanismo requer um ajuste para diferentes tipos de maquinagem e materiais de trabalho.



a)

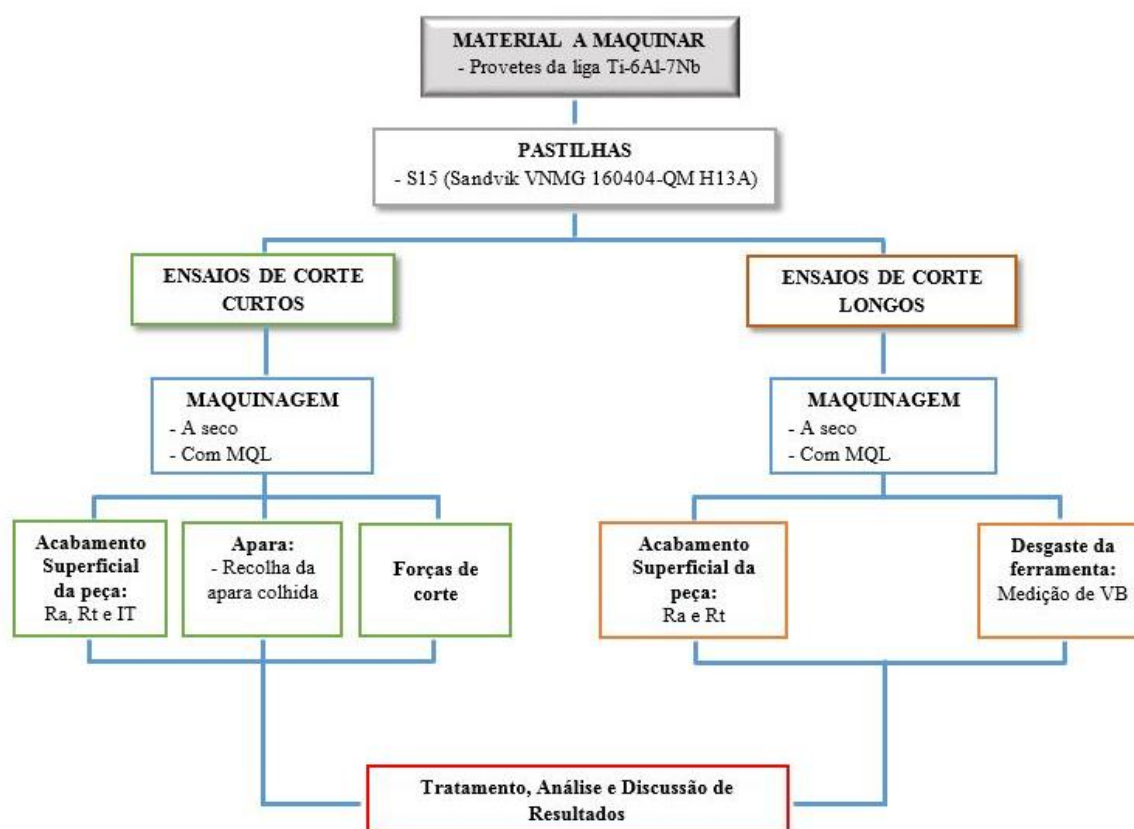


b)

**Figura 34** - Sistema MQL da UNIST utilizado nos ensaios: a) representação do aerossol externo, b) representação de todo o sistema MQL incorporado no torno CNC.

### 3.7 SÍNTESE

É apresentado no organograma da Figura 35, de uma forma sucinta e esquemática, todo o procedimento experimental realizado na maquinagem da liga em estudo, que vai desde a aquisição dos provetes à análise dos resultados.



**Figura 35** - Organograma do procedimento experimental executado na presente dissertação.

---

# Capítulo 4

---

Análise e discussão de resultados

---





## **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo da presente dissertação, por forma a atingirem os objetivos pretendidos inicialmente, e apresentados no primeiro capítulo. Como tal, o quarto capítulo foi subdividido em dois grupos, onde se apresentam e discutem os resultados obtidos nos ensaios de corte curtos e longos, respetivamente.

No primeiro subcapítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de corte curtos, onde é caracterizada e discutida a apara obtida, são decifrados os valores das forças de corte intrínsecas à maquinagem, sendo ainda feita a análise dos valores obtidos para a rugosidade e precisão dimensional, com recurso a gráficos. De salientar que todos os valores apresentados foram obtidos para cada conjunto de parâmetros de corte analisado.

No segundo subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de corte longos onde, para além da análise à rugosidade superficial. Tal como acontece nos ensaios de corte curtos, é determinado o tempo de vida da ferramenta de corte, para cada um dos conjuntos de parâmetros de corte utilizados.

### **4.1 ENSAIOS DE CORTE CURTOS**

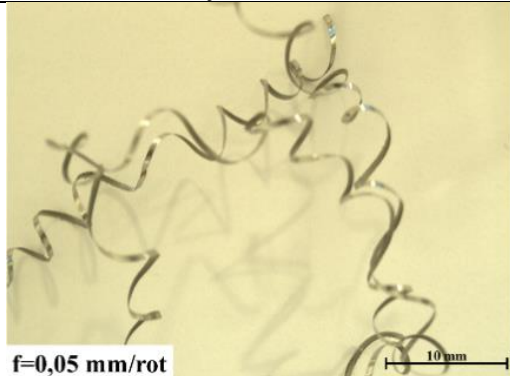
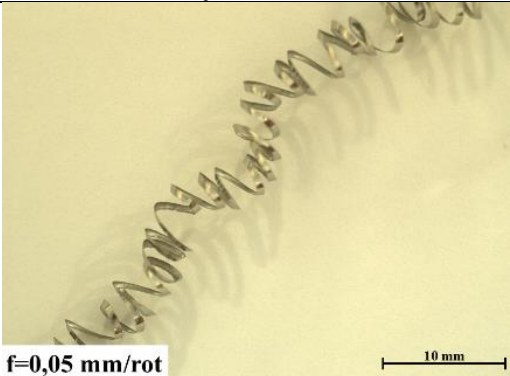
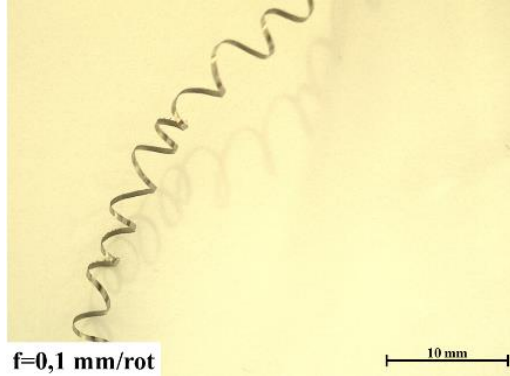
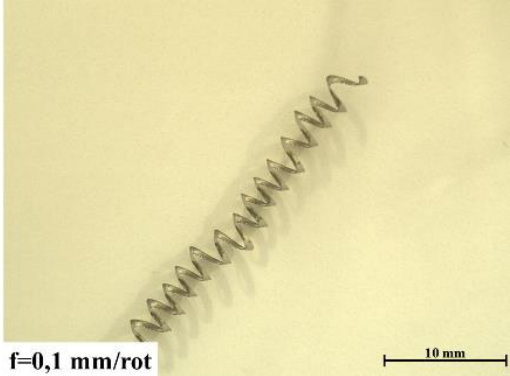
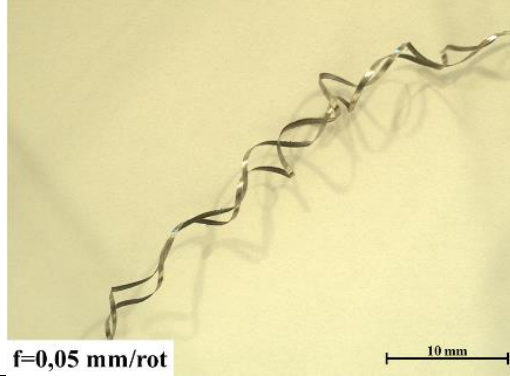
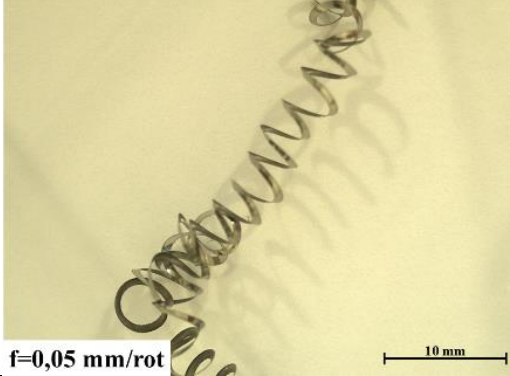
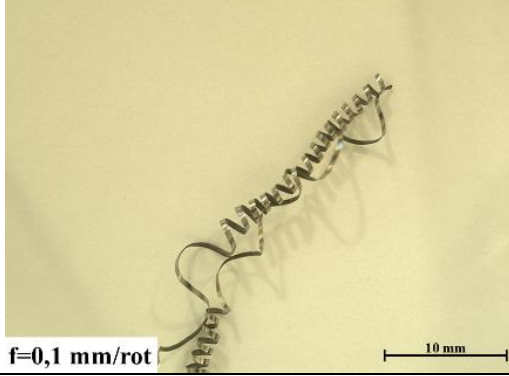
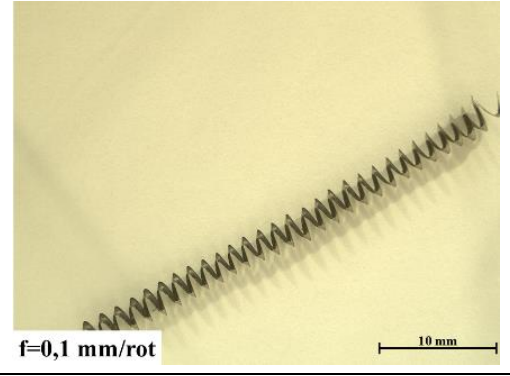
Os ensaios de corte curtos foram realizados tal como o descrito no capítulo 3.4.1. De seguida são apresentados os resultados de cada um dos parâmetros de maquinabilidade analisados nos ensaios, classificação da apara obtida, forças de corte, medição da rugosidade e precisão dimensional. Em anexo (Anexo III), estão presentes os valores obtidos experimentalmente.

#### **4.1.1 Classificação da apara obtida**

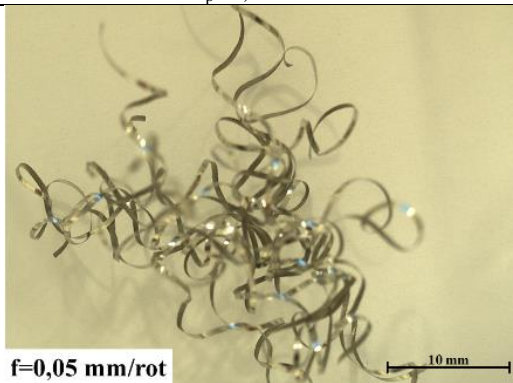
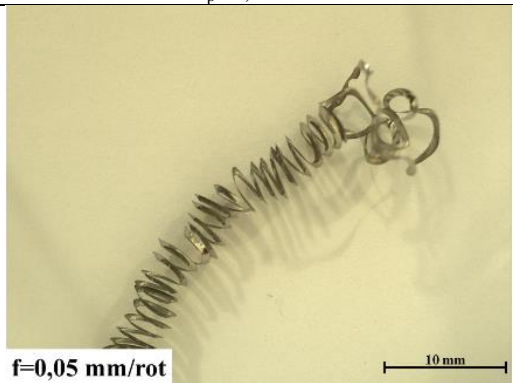
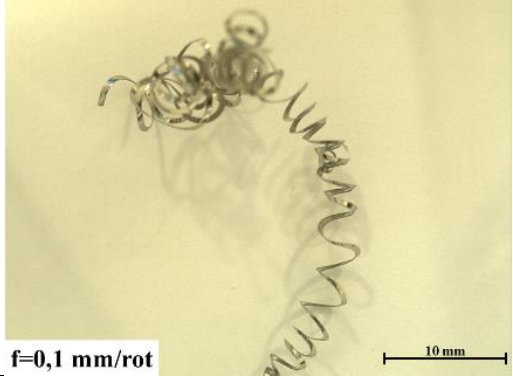
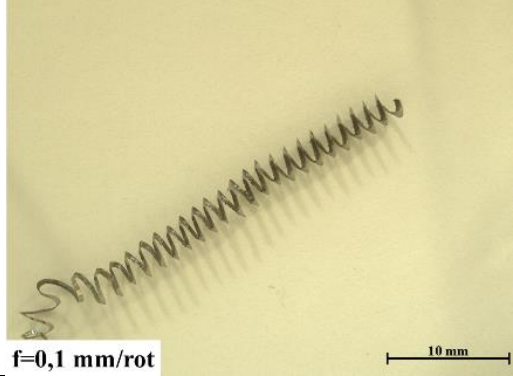
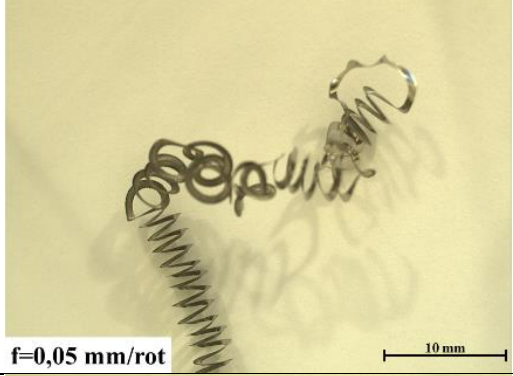
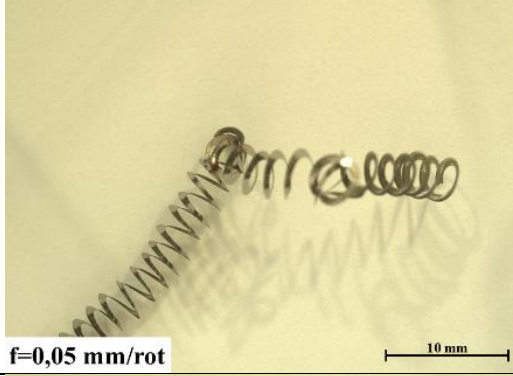
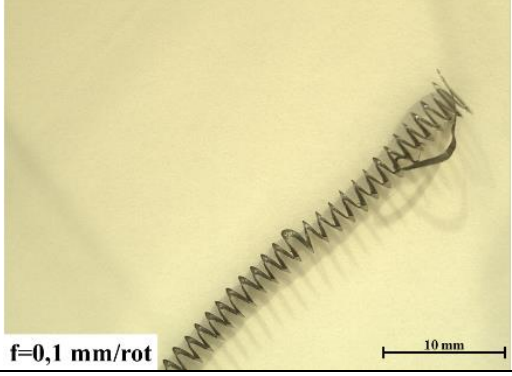
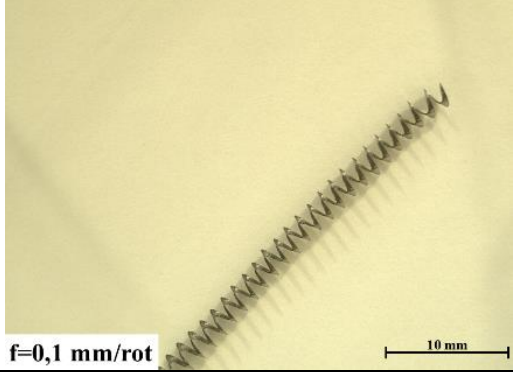
As aparas obtidas nos ensaios de corte curtos para os diferentes parâmetros de teste são, em geral, do tipo 4 (helicoidal em gume), variando apenas dentro desta forma em longa (4.1) e enrolada (4.3), segundo a norma ISO 3685/1993.

As tabelas 14, 15, 16 e 17 retratam as formas das aparas obtidas para cada conjunto de parâmetros de corte testados, sendo também feita a distinção relativamente à presença, ou não, de lubrificação.

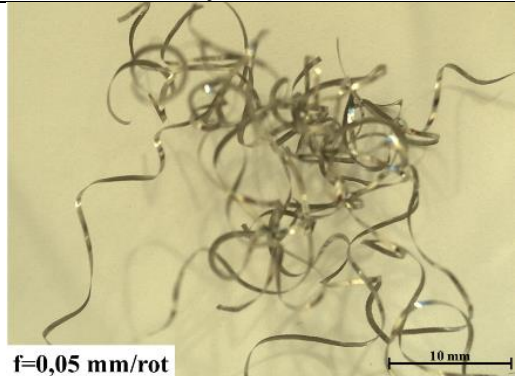
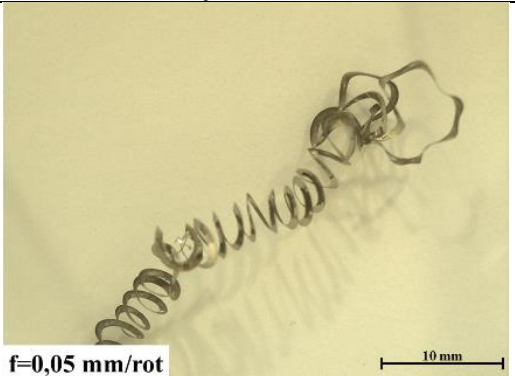
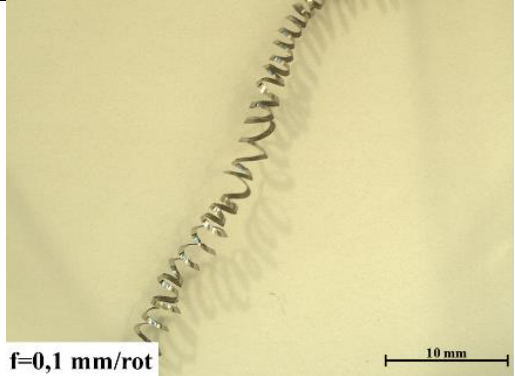
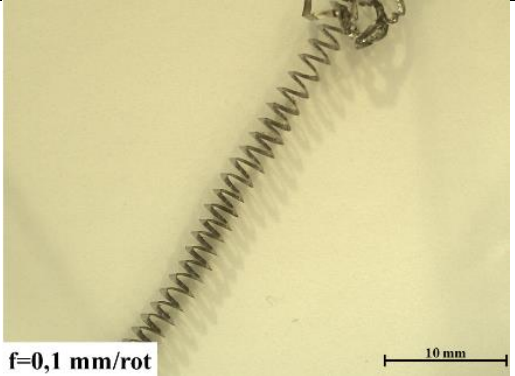
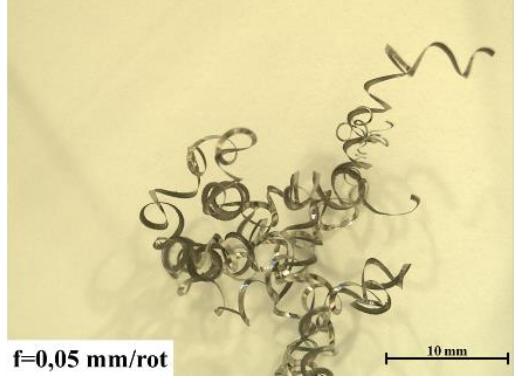
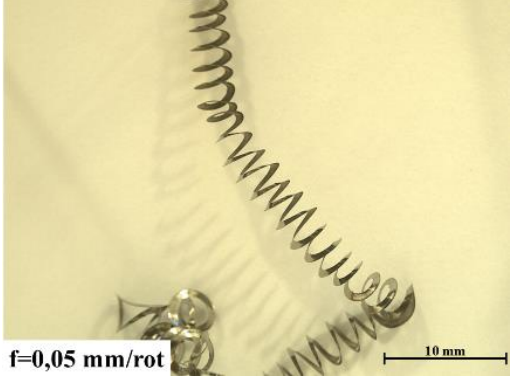
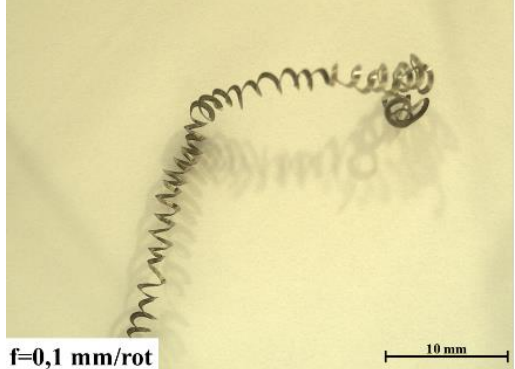
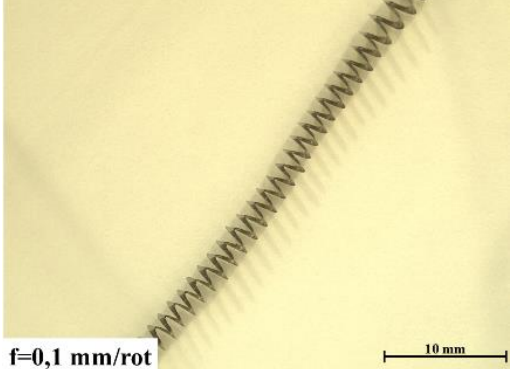
**Tabela 14** - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a  $V_c=30$  m/min, a seco e com MQL.

	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,50$ mm
Seco	 $f=0,05$ mm/rot	 $f=0,05$ mm/rot
	 $f=0,1$ mm/rot	 $f=0,1$ mm/rot
MQL	 $f=0,05$ mm/rot	 $f=0,05$ mm/rot
	 $f=0,1$ mm/rot	 $f=0,1$ mm/rot

**Tabela 15** - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a  $V_c=60$  m/min, a seco e com MQL.

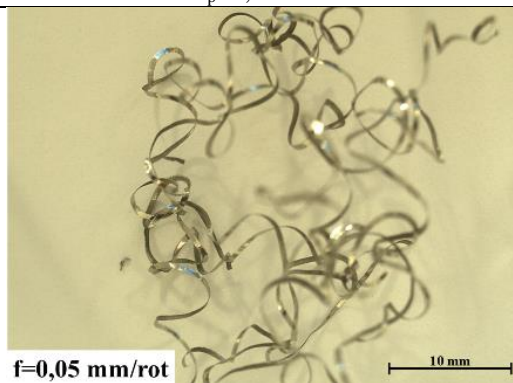
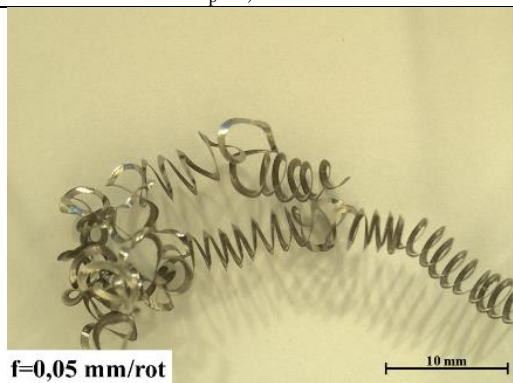
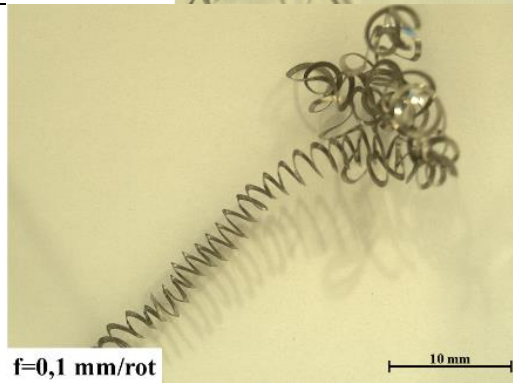
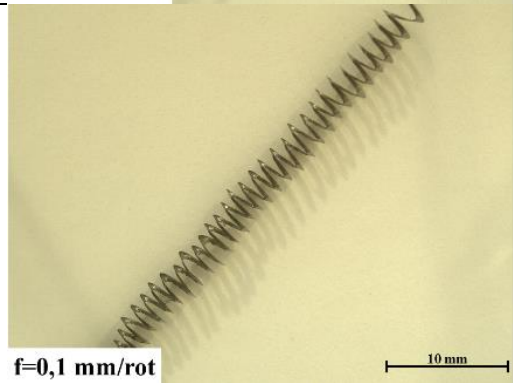
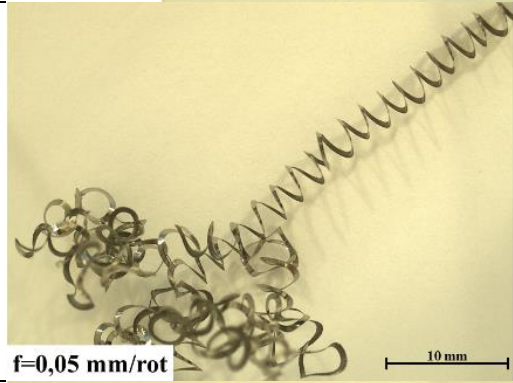
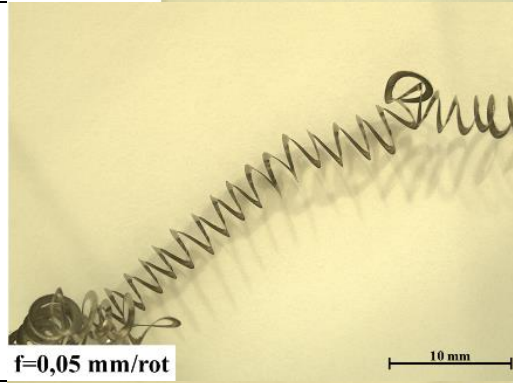
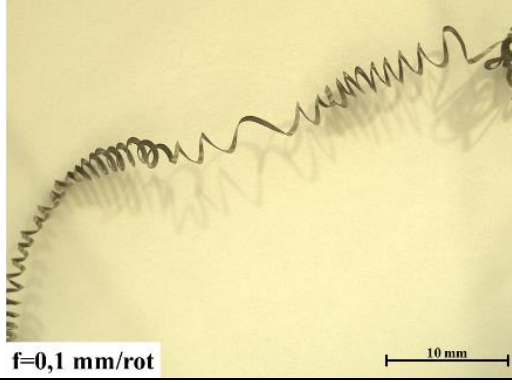
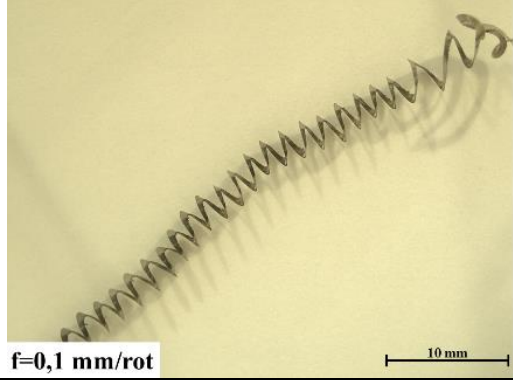
	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,50$ mm
Seco	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>
	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>
MQL	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>
	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>

**Tabela 16** - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a  $V_c=90$  m/min, a seco e com MQL.

	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,50$ mm
Seco	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>
	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>
MQL	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>
	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>



**Tabela 17** - Aparas obtidas nos ensaios de corte curtos com a  $V_c=120$  m/min, a seco e com MQL.

	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,50$ mm
Seco	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>
	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>
MQL	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,05</math> mm/rot</p>
	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>	 <p><math>f=0,1</math> mm/rot</p>

Da análise das tabelas anteriores, é notória a alternância do tipo de apara, entre helicoidal em gume longa e enrolada, para o mesmo material e quando realizados os testes com parâmetros diferentes. Para avanços reduzidos e baixas profundidades de corte, caso dos testes realizados com  $f=0,05$  mm/rot e  $a_p=0,25$  mm, a apara toma a forma enrolada (4.3), para todas as velocidades de corte testadas. Para os restantes testes, a apara obtida é helicoidal em gume longa.

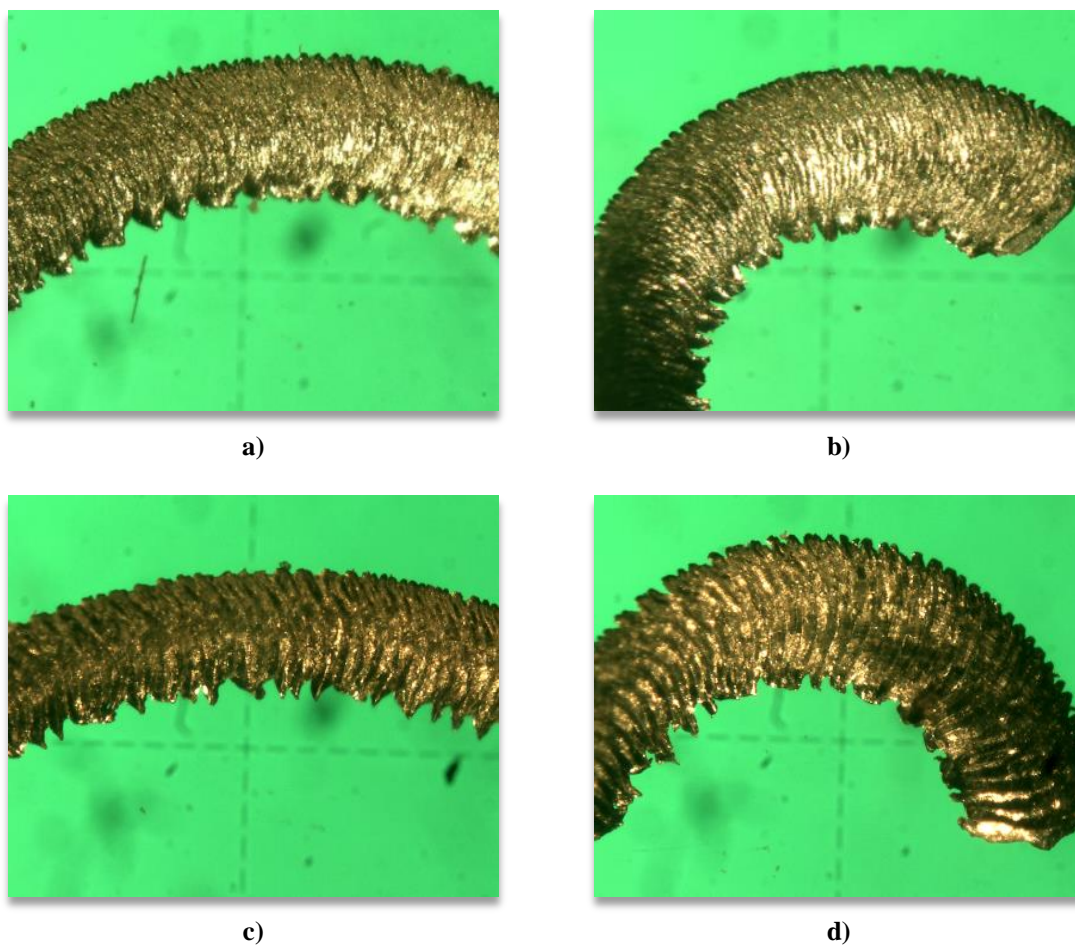
Na Tabela 18 é realizada a classificação referente às aparas obtidas para todos os parâmetros utilizados nos ensaios de corte curtos.

**Tabela 18** - Classificação referente às formas das aparas obtidas nos ensaios de corte curtos, segundo a norma ISO 3685/1993.

Lub	f [mm/rot]	V <sub>c</sub> =30 [m/min]		V <sub>c</sub> =60 [m/min]		V <sub>c</sub> =90 [m/min]		V <sub>c</sub> =120 [m/min]	
		a <sub>p</sub> =0,25 mm	a <sub>p</sub> =0,50 mm	a <sub>p</sub> =0,25 mm	a <sub>p</sub> =0,50 mm	a <sub>p</sub> =0,25 mm	a <sub>p</sub> =0,50 mm	a <sub>p</sub> =0,25 mm	a <sub>p</sub> =0,50 mm
Seco	0,05	4,3	4,1	4,3	4,1	4,3	4,1	4,3	4,1
	0,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
MQL	0,05	4,1	4,1	4,1	4,1	4,3	4,1	4,1	4,1
	0,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1

Quando analisadas ao microscópio ótico, as aparas obtidas na maquinagem da liga em estudo apresentam, em corte transversal, uma forma serrilhada característica destes materiais, como mostra a Figura 36. Pela análise da figura é possível verificar que, para as velocidades de corte extremas utilizadas nos ensaios, 30 e 120 m/min, sem lubrificação e com MQL, o aspeto serrilhado mantém-se, sendo que para a velocidade maior a forma serrilhada é ligeiramente mais regular.

O aspeto semelhante entre as aparas obtidas nos diferentes ensaios, seja ao nível exterior ou em corte transversal, deve-se sobretudo à utilização de baixos avanços e sendo estes de valores próximos entre si.



**Figura 36** - Apara vista ao microscópio ótico, em corte transversal,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm: a)  $V_c=30$  m/min, a seco, b)  $V_c=30$  m/min, com MQL c)  $V_c=120$  m/min, a seco, d)  $V_c=120$  m/min, com MQL.

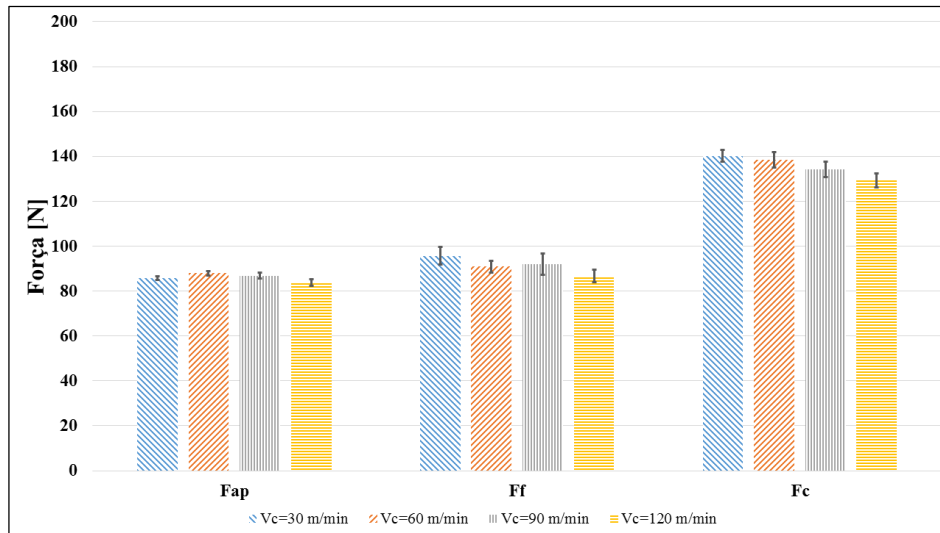
#### 4.1.2 Forças de corte

Nesta secção são abordadas as forças obtidas durante o processo de maquinagem, recorrendo à determinação experimental da força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força de penetramento ( $F_{ap}$ ) da liga em estudo.

Dada a variação das forças de corte para diferentes parâmetros de maquinagem, é importante tentar decifrar a influência da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, desgaste das pastilhas ou lubrificação nas diferentes componentes da força de maquinagem.

##### 4.1.2.1 Influência da velocidade de corte nas forças de corte

A Figura 37 caracteriza e quantifica as forças de corte em função da velocidade de corte, usando o mesmo avanço e profundidade de corte.



**Figura 37** - Comparação das forças de corte para diferentes velocidades usando  $f=0,1$  mm/rot,  $a_p=0,5$  mm, pastilhas novas, a seco. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Pela observação da Figura 37 é visível uma diminuição das três componentes da força de corte com o aumento da velocidade de corte, sendo que esta diminuição se deve a um aumento da temperatura na zona de corte para velocidades de corte maiores, o que origina uma diminuição da dureza do material.

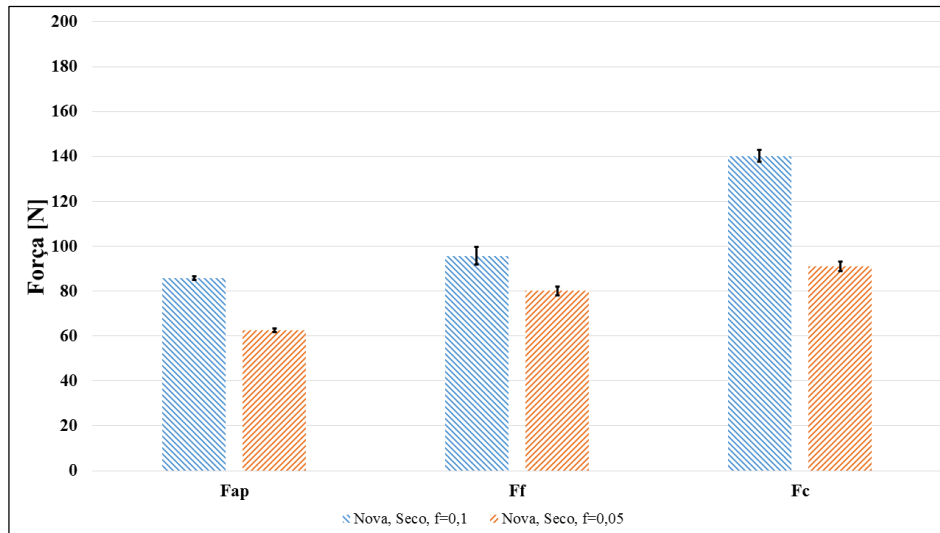
Estes resultados mostram ainda que a componente  $F_c$  é a que tem maior impacto nas forças de corte, sendo o seu máximo atingido de 140 N para  $V_c=30$  m/min. Já a componente com menor impacto para os parâmetros testados é  $F_{a_p}$ , sendo o mínimo atingido de 84 N para  $V_c=120$  m/min.

De entre outros factores, a obtenção destes resultados deve-se ao uso de uma ferramenta de corte com ângulo de inclinação negativo, uma vez que este afeta a relação entre as forças de corte e o atrito entre a ferramenta e a peça de uma forma contrária ao uso de ângulo de inclinação positivo nas ferramentas (Fang, 2005).

#### 4.1.2.2 Influência do avanço nas forças de corte

A Figura 38 mostra as forças de corte em função do avanço, usando para isso a mesma velocidade de corte e mesma profundidade. Esta análise revela que as componentes da força de corte aumentam à medida que o avanço também aumenta, para os avanços testados. Comparando o avanço de 0,05 mm/rot e 0,1 mm/rot é notório, pela representação gráfica, que existe um aumento de cerca de 20 N para as componentes  $F_{a_p}$  e  $F_f$  e 40 N para  $F_c$ .

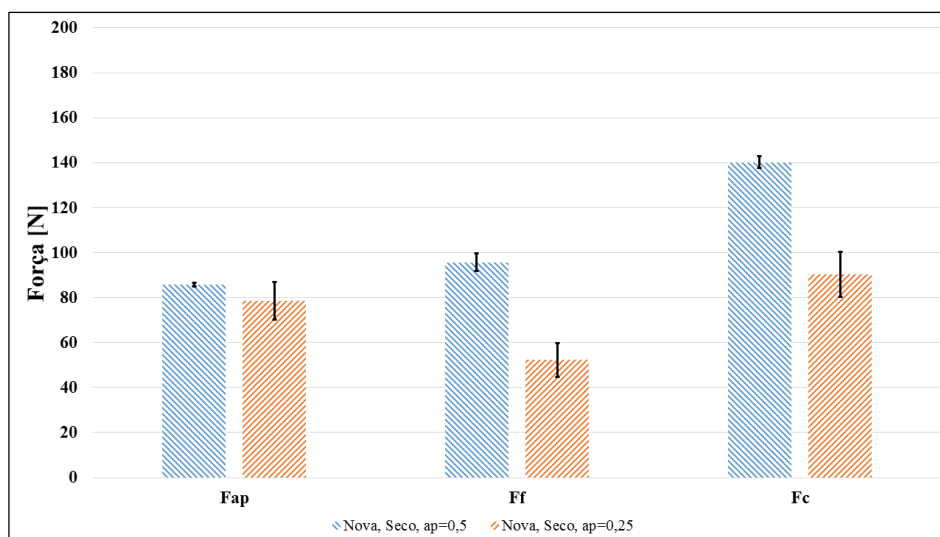




**Figura 38** - Forças de corte usando  $V_c=30$  m/min,  $a_p=0,5$  mm e dois avanços,  $f=0,1$  mm/rot e  $f=0,05$  mm/rot. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

#### 4.1.2.3 Influência da profundidade nas forças de corte

A Figura 39 mostra as forças de corte em função da profundidade de corte, usando a mesma velocidade de corte e avanço.



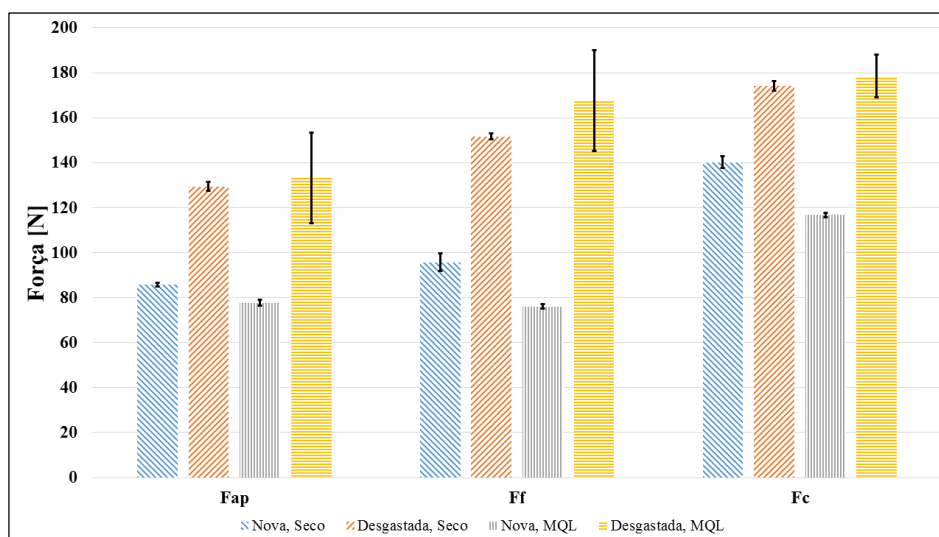
**Figura 39** - Forças de corte usando  $V_c=30$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e duas profundidades de corte,  $a_p=0,50$  mm e  $a_p=0,25$  mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Tal como acontece para o avanço, a variação da profundidade de corte provoca um efeito semelhante nas forças de corte, como mostra a Figura 39. A análise da figura mostra que o

aumento da profundidade de corte de 0,25 mm para 0,50 mm faz com que o valor das três componentes da força de corte aumentem.

#### 4.1.2.4 Influência do desgaste da ferramenta e lubrificação nas forças de corte

Dada a influência do desgaste das pastilhas e do modo de lubrificação que é usado na maquinagem na obtenção dos valores da rugosidade e tipo de aparas, também é importante fazer essa avaliação nas forças de corte. Assim, a Figura 40 mostra a comparação das forças de corte obtidas aquando do uso de pastilhas novas e desgastadas, bem como a maquinagem a seco e com MQL, para os mesmos valores de velocidade, avanço e profundidade de corte.



**Figura 40** - Comparação das forças de corte para pastilhas novas e desgastadas, a seco e com MQL, usando  $V_c=30$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Pela observação da Figura 40 é possível concluir que o uso de pastilhas novas ou desgastadas, bem como o uso de maquinagem a seco ou MQL, têm bastante influência no valor das três componentes das forças de corte. Começando pela avaliação das pastilhas novas e desgastadas verifica-se que, para os parâmetros testados experimentalmente a seco, o uso de pastilhas novas diminui o valor total das forças de corte relativamente ao uso de pastilhas desgastadas entre 20 a 37%, aproximadamente. A mesma comparação pode ser feita aquando do uso das pastilhas novas com MQL, sendo que a diminuição do valor das forças de corte varia neste caso entre 35 e 55%, aproximadamente.

Relativamente ao uso de MQL, verifica-se que o valor das forças de corte nas três componentes diminuíram, para os parâmetros testados experimentalmente com pastilhas novas, em comparação com a maquinagem a seco, numa gama de valores entre 8 e 20%. Prevê-se que isto possa ocorrer devido à redução do atrito e remoção de aparas pelo MQL, melhorando o corte (Carou, Rubio e Davim, 2015). Já uma breve alusão ao uso de pastilhas

desgastadas revela que para a maquinagem a seco ou com MQL o valor das forças de corte são semelhantes, existindo um ligeiro aumento das mesmas com o uso de MQL, nas três componentes das forças de corte. No entanto, isto deve-se ao desgaste da ferramenta de corte e não, diretamente, com o uso de MQL.

#### 4.1.3 Medição da rugosidade e acabamento superficial

Nesta secção é analisada a rugosidade superficial obtida nos diferentes ensaios, assim como a precisão dimensional. Para isso, analisaram-se os resultados da Ra, Rt, bem como IT.

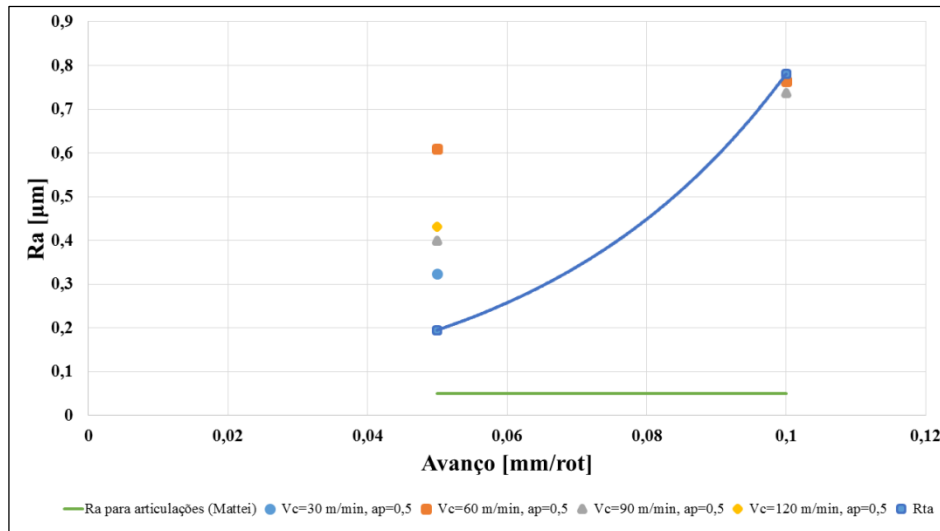
Um dos fatores que maior influência tem na rugosidade superficial são os parâmetros de corte. Assim, é feita uma análise ilustrativa da influência do avanço, da profundidade de corte e da velocidade de corte na rugosidade superficial. É ainda feita uma comparação dos resultados obtidos com uma pastilha nova e desgastada, assim como sem lubrificação e com MQL.

##### 4.1.3.1 Influência do avanço na rugosidade

Tal como mostram as equações teóricas 2 e 3, o avanço é o parâmetro de corte que maior influência tem na rugosidade superficial. A Figura 41 mostra a evolução da Ra em função dos diferentes avanços utilizados nos ensaios de corte curtos, para todas as velocidades testadas, sendo os testes realizados a seco. Para além dos valores obtidos na prática, são representados os valores teóricos obtidos pela Equação 3, e ainda a Ra assumida por Mattei *et al.* (2011), como a utilizada na zona funcional de uma articulação artificial.

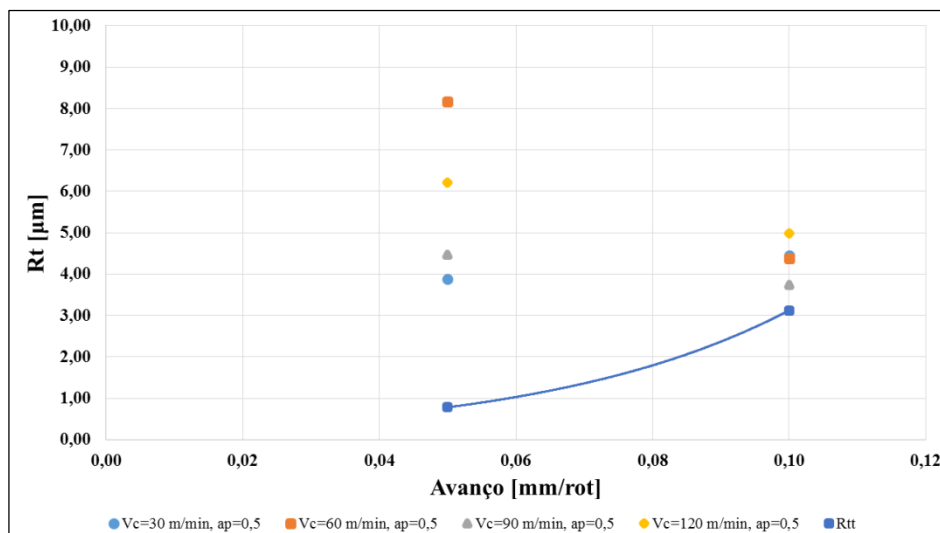
É notório pela análise da Figura 41 que o aumento do avanço tem como consequência um aumento da rugosidade, como seria expectável. Para avanços mais altos, os valores obtidos experimentalmente aproximam-se bastante do valor teórico esperado, 0,78  $\mu\text{m}$ , ao contrário de avanços menores, que se distanciam bastante do valor teórico de 0,20  $\mu\text{m}$ . Com isto prevê-se que o uso de avanços menores do que 0,1 mm/rot tenham influência negativa na rugosidade superficial, uma vez que os resultados obtidos para o avanço de 0,05 mm/rot são bastante oscilatórios e díspares, apesar de serem conseguidos menores valores de Ra.

Comparativamente com o valor assumido por Mattei *et al.* (2011) como o utilizado na zona funcional de uma articulação artificial, os resultados obtidos no processo de torneamento distanciam-se em cerca de 0,15  $\mu\text{m}$ , o que para um processo de torneamento é satisfatório, sendo no entanto necessária retificação da peça para que se consiga atingir o valor desejado.



**Figura 41** - Ra em função do avanço, para as velocidades de corte testadas, a seco.

A Figura 42 mostra a evolução da Rt em função dos diferentes avanços utilizados nos ensaios de corte curtos para todas as velocidades testadas, sendo os testes realizados a seco. Para além dos valores experimentais, são representados os valores teóricos obtidos pela Equação 2.

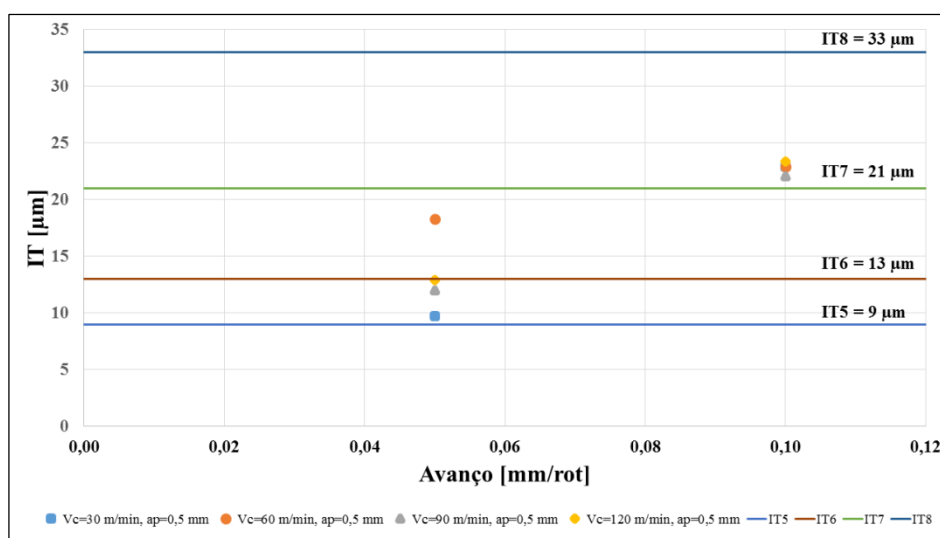


**Figura 42** - Rt em função do avanço, para as velocidades de corte testadas, a seco.

Pela observação da Figura 42 verifica-se que para avanços mais baixos a discrepância entre valores da rugosidade total para as velocidades de corte testadas é maior. Se para o avanço de 0,10 mm/rot a oscilação se dá entre 3,7 e 5,0  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, para o avanço de 0,5 mm/rot o intervalo de valores é entre 3,9 e 8,2  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Para o menor

avanço testado, nota-se tendencialmente que o valor da rugosidade máxima aumenta com o aumento da velocidade de corte. Em comparação com a curva teórica, os valores experimentais são bastante superiores para todos os parâmetros testados.

A Figura 43 mostra a evolução do IT em função dos diferentes avanços utilizados nos ensaios de corte curtos para todas as velocidades testadas, sendo os testes realizados a seco. Para além dos valores obtidos na prática, a Figura 43 mostra os valores de IT normalizados recomendados pela literatura para o torneamento geral (IT7 à IT11) e para o torneamento em acabamento (IT5 à IT7) (Morais, 2012), a fim de averiguar se os valores de IT calculados se encontram dentro da gama de IT normalizado.

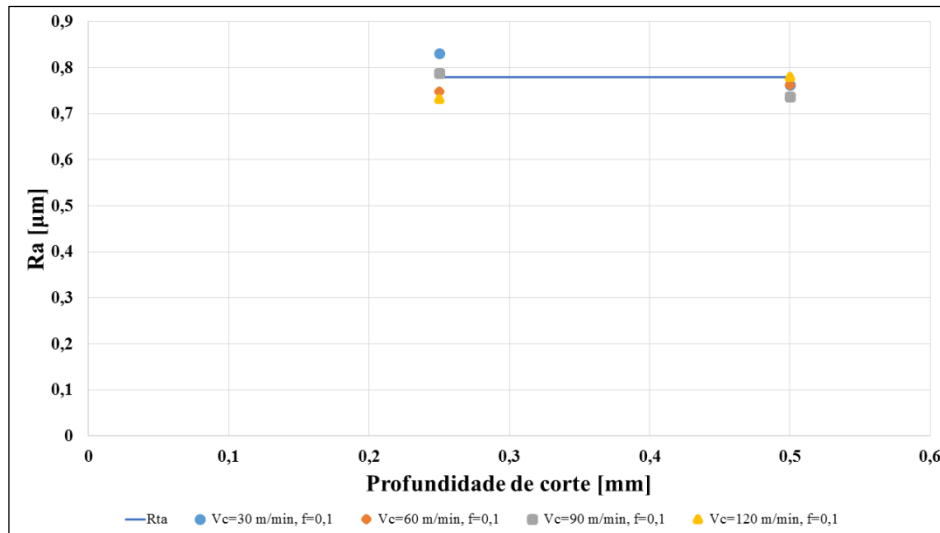


**Figura 43** - IT em função do avanço para as velocidades de corte testadas, a seco.

Pela observação da Figura 43 conclui-se que para avanços menores, o intervalo de tolerância obtido também é menor. Para o avanço de 0,05 mm/rot o IT está compreendido entre IT5 e IT7, já para o avanço de 0,10 mm/rot o IT obtido fica entre IT7 e IT8.

#### 4.1.3.2 Influência da profundidade de corte na rugosidade

Apesar da expressão teórica para o cálculo da rugosidade média aritmética (Equação 3) não contemplar a profundidade de corte como uma das variáveis, este parâmetro pode ter influência na prática. A Figura 44 mostra a evolução da Ra em função das diferentes profundidades de corte utilizadas nos ensaios de corte curtos para todas as velocidades testadas, sendo os testes realizados a seco. Para além dos valores experimentais, é ilustrado o valor teórico obtido pela Equação 3.

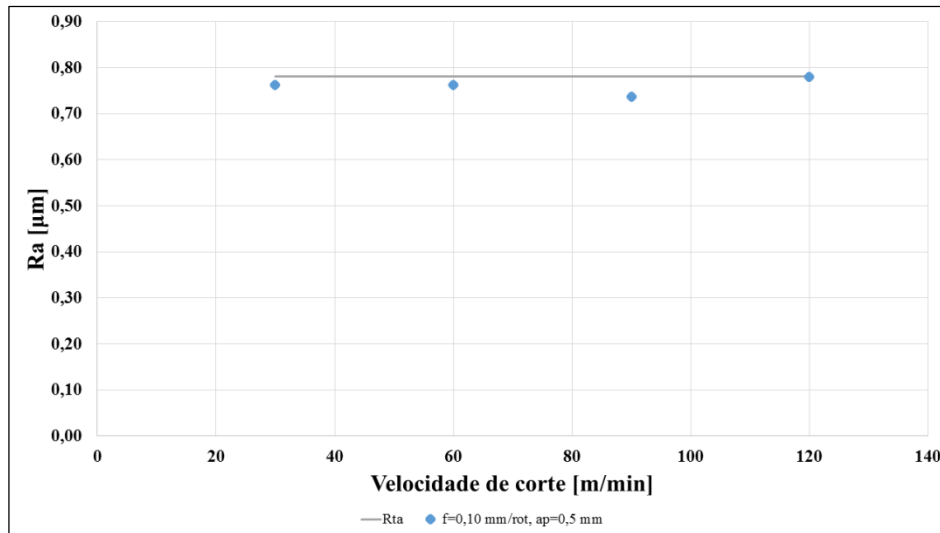


**Figura 44** - Ra em função da profundidade de corte, para as velocidades de corte testadas, a seco.

Pela análise da Figura 44 não é clara uma alteração na rugosidade para as diferentes profundidades de corte testadas, sendo que os valores obtidos variam ligeiramente, mas muito próximos do valor teórico, tanto para a profundidade de corte de 0,25 mm como de 0,5 mm, sendo a discrepância máxima de rugosidade obtida de 0,07  $\mu\text{m}$  para  $V_c=30$  m/min e  $a_p=0,25$  mm.

#### 4.1.3.3 Influência da velocidade de corte na rugosidade

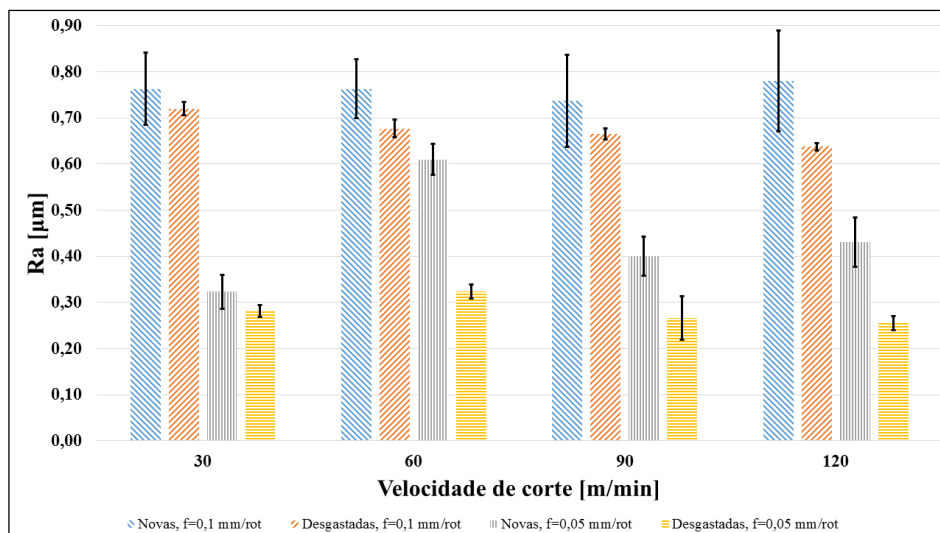
Assim como a profundidade de corte, a velocidade de corte não pertence às variáveis usadas no cálculo teórico da rugosidade (Equação 3). A Figura 45 mostra a evolução da Ra em função das diferentes velocidades de corte utilizadas nos ensaios de corte curtos, sendo os testes realizados a seco. Para além dos valores experimentais, é mostrado o valor teórico obtido pela Equação 3. Pela análise da figura é visível que a velocidade de corte tem pouca influência na rugosidade, mantendo-se praticamente constante para toda a gama de velocidades testadas. Comparativamente com o avanço e profundidade de corte, a velocidade de corte é o parâmetro que menor influência teve na rugosidade obtida, para as condições de corte experimentais.



**Figura 45** - Ra em função da velocidade de corte, para  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, a seco.

#### 4.1.3.4 Influência do desgaste da pastilha na rugosidade

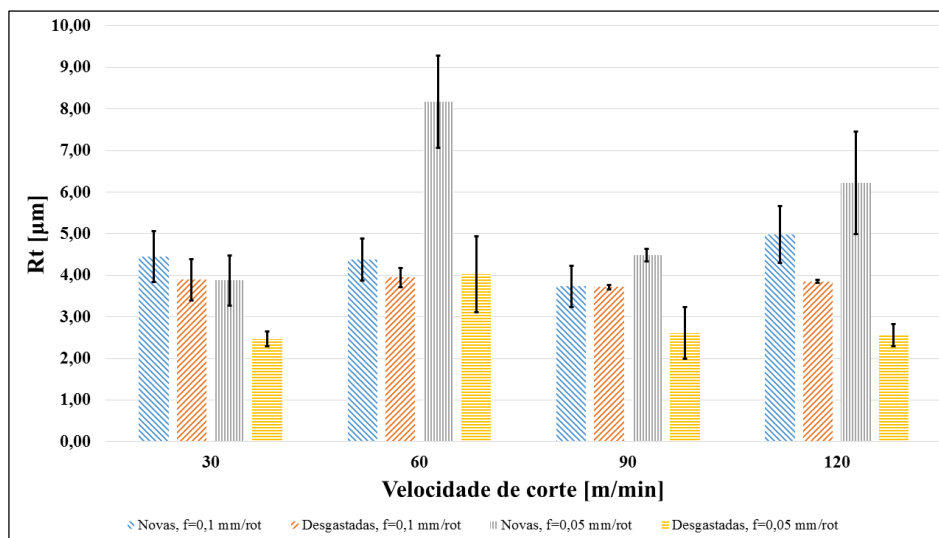
À primeira vista, o desgaste de uma ferramenta de corte irá provocar um pior acabamento superficial, e consequente aumento da rugosidade, uma vez que a pastilha já não terá a sua forma inicial e o seu contacto com a peça se altera. Na prática, isto poderá não se verificar, dependendo do nível de desgaste da pastilha. A Figura 46 mostra graficamente os valores da Ra, em função da velocidade de corte, obtidos para uma pastilha nova e desgastada.



**Figura 46** - Ra em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, a seco, usando  $a_p=0,5$  mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Observando a Figura 46 verifica-se que a rugosidade superficial obtida é menor aquando do uso de uma pastilha desgastada, para os dois avanços utilizados, ao contrário do que inicialmente seria previsto. Isto poderá dever-se ao facto de a aresta de corte inicialmente provocar uma rugosidade maior, sendo que com o decorrer do tempo de maquinagem a sua superfície altera-se de certa forma que o valor da rugosidade diminui.

A Figura 47 mostra os valores da  $R_t$ , em função da velocidade de corte, obtidos para uma pastilha nova e desgastada.



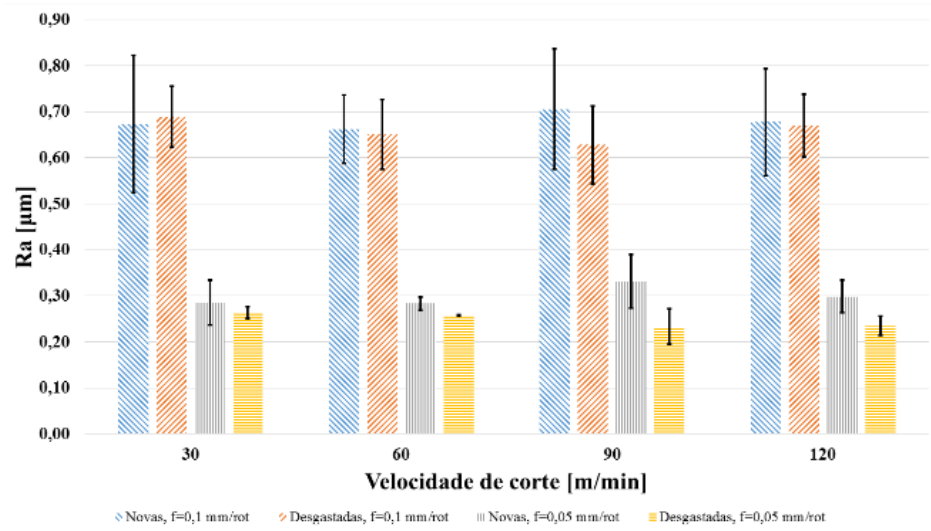
**Figura 47** -  $R_t$  em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, a seco, usando  $a_p=0,5$  mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Tal como acontece para a  $R_a$ , a  $R_t$  também é menor quando é usada uma ferramenta desgastada como mostra a Figura 47, assumindo-se os mesmos motivos dados anteriormente como justificação para este facto.

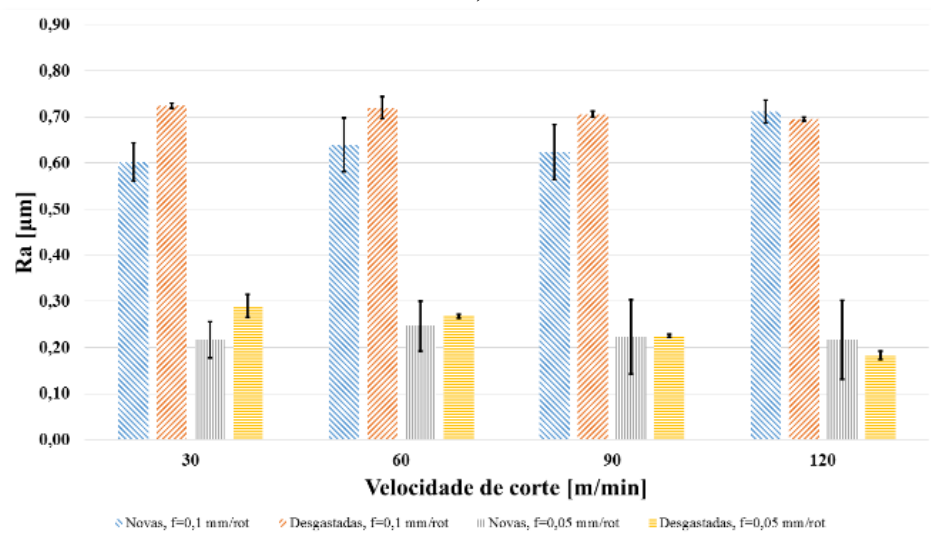
Dada a verificação acima citada referente à rugosidade, obtida com uma ferramenta nova e desgastada, é importante avaliar se o mesmo acontece aquando do uso de MQL. A Figura 48 mostra graficamente os valores da  $R_a$ , em função da velocidade de corte, obtidos para uma pastilha nova e desgastada, usando MQL e duas profundidades de corte. Desta conclui-se que, quando maquinado com MQL, a rugosidade tende a equivaler-se para ferramentas novas e desgastadas, sendo no entanto que para profundidades de corte menores ( $a_p=0,25$  mm), a rugosidade com ferramentas desgastadas é maior para a gama de velocidades de corte testadas. Isto permite-nos especular sobre algumas questões, como é o caso da influência da profundidade de corte. Dado que para profundidades de corte maiores ( $a_p=0,5$  mm), um maior desgaste apresenta uma rugosidade menor em comparação com as ferramentas novas, isto sugere que como a pastilha penetra mais no provete de ensaio na altura de corte e ultrapassa a distância do seu raio de ponta em penetração, não sente consideravelmente o efeito do desgaste da ponta em termos de rugosidade. Já para profundidades de corte menores o efeito do desgaste da ponta da ferramenta é mais relevante,



uma vez que apenas a ponta da pastilha desgastada entra em contacto com o provete. Com menores profundidades de corte, o corte torna-se por si só mais instável também, o que aumenta as vibrações no processo e, conseqüentemente, um aumento da rugosidade. Outro fator a ter em conta seria o tipo de desgaste verificado na ferramenta de corte, uma vez que diferentes tipos alteram o resultado final da rugosidade.



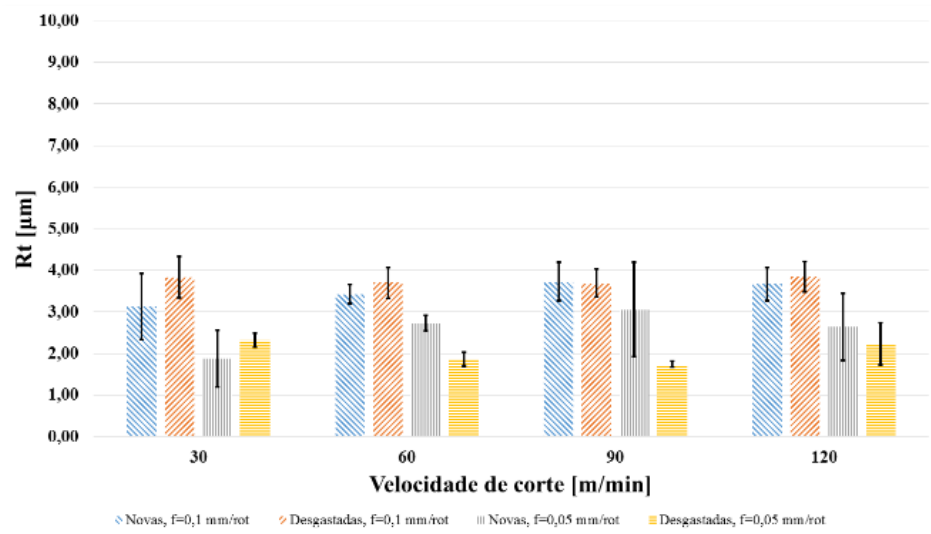
a)



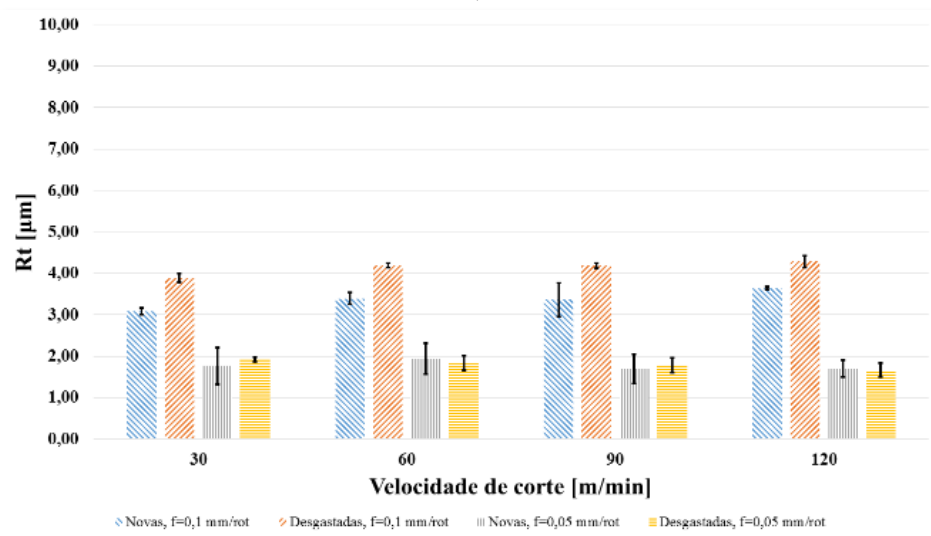
b)

**Figura 48** - Ra em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, com MQL: a) profundidade de corte de 0,5 mm, b) profundidade de corte de 0,25 mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

A Figura 49 retrata os valores da Rt, em função da velocidade de corte, obtidos para uma pastilha nova e desgastada, usando MQL e diferentes profundidades de corte.



a)



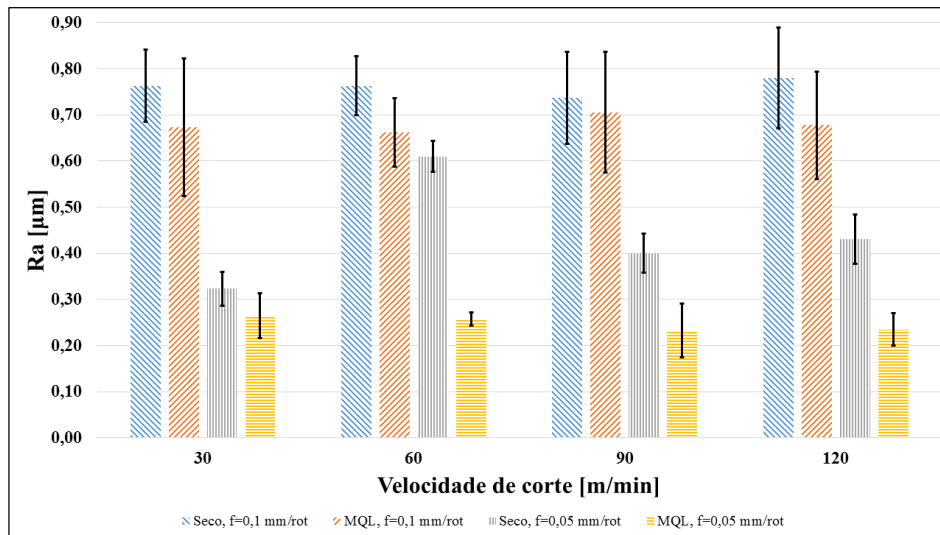
b)

**Figura 49** - Rt em função da velocidade de corte, para ferramentas de corte novas e desgastadas, com MQL: a) profundidade de corte de 0,5 mm, b) profundidade de corte de 0,25 mm Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Tal como acontece para a Ra, de forma muito semelhante se passa para a Rt, como mostra a Figura 49. No entanto, para este caso é mais notório o efeito do desgaste das ferramentas de corte, principalmente para avanços maiores ( $f=0.1$  mm/rot). Comparativamente com a maquinagem a seco, o valor máximo da Rt com o uso de MQL é bastante inferior.

#### 4.1.3.5 Influência da lubrificação MQL na rugosidade

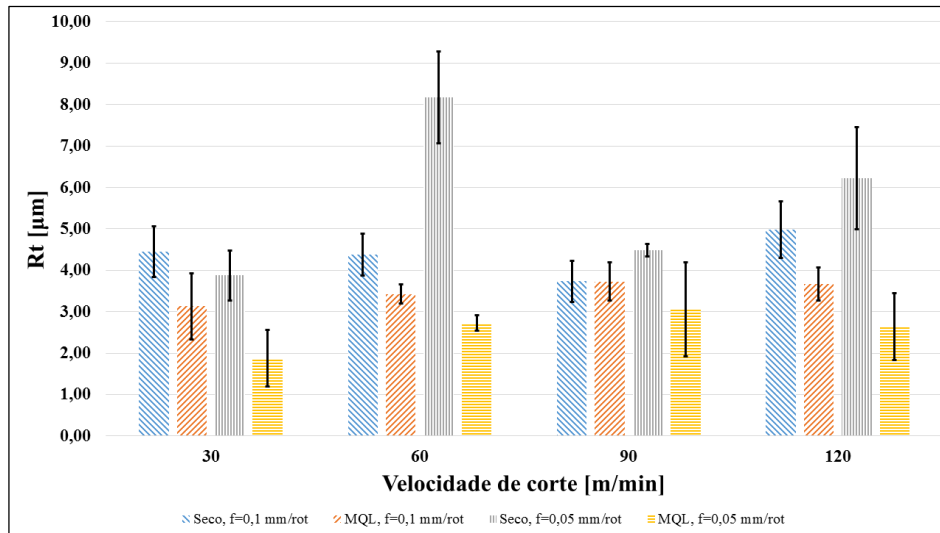
Pretendendo avaliar a influência do MQL na rugosidade superficial, a Figura 50 mostra os valores da Ra em função da velocidade de corte para os ensaios realizados a seco e com MQL.



**Figura 50** - Ra em função da velocidade de corte, para maquinagem a seco e com MQL, usando  $a_p=0,5$  mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

Da Figura 50 é possível observar que o uso de MQL diminui de uma forma considerável os valores da Ra, em comparação com os mesmos ensaios realizados a seco, para as velocidades de corte testadas. O decréscimo dos valores obtidos ronda os  $0,1 \mu\text{m}$  para todas as velocidades de corte. Isto revela um dos benefícios do uso de MQL na obtenção de superfícies com boa qualidade superficial. O mesmo decréscimo pode ser ainda explicado pela mais fácil expulsão da apara com MQL, o que resulta numa menor probabilidade de a apara se agarrar à peça, não alterando assim a superfície maquinada.

A Figura 51 mostra os valores da Rt em função da velocidade de corte para os ensaios realizados a seco e com MQL. Do mesmo modo que a Ra, a Rt também diminuiu substancialmente aquando do uso de MQL, em comparação com os testes realizados a seco, para todas as velocidades de corte testadas.



**Figura 51** - Rt em função da velocidade de corte, para maquinagem a seco e com MQL, usando  $a_p=0,5$  mm. Os valores representam a média  $\pm$  DP de 3 experiências.

## 4.2 ENSAIOS DE CORTE LONGOS

Os ensaios de corte longos foram realizados tal como o descrito no capítulo 3.4.1. Ao longo deste subcapítulo, são apresentados e analisados os aspetos referentes ao desgaste da ferramenta e à rugosidade superficial, sendo dado no entanto maior ênfase à análise e determinação do tempo de vida da ferramenta de corte. Em anexo (Anexo IV), estão presentes os valores obtidos experimentalmente.

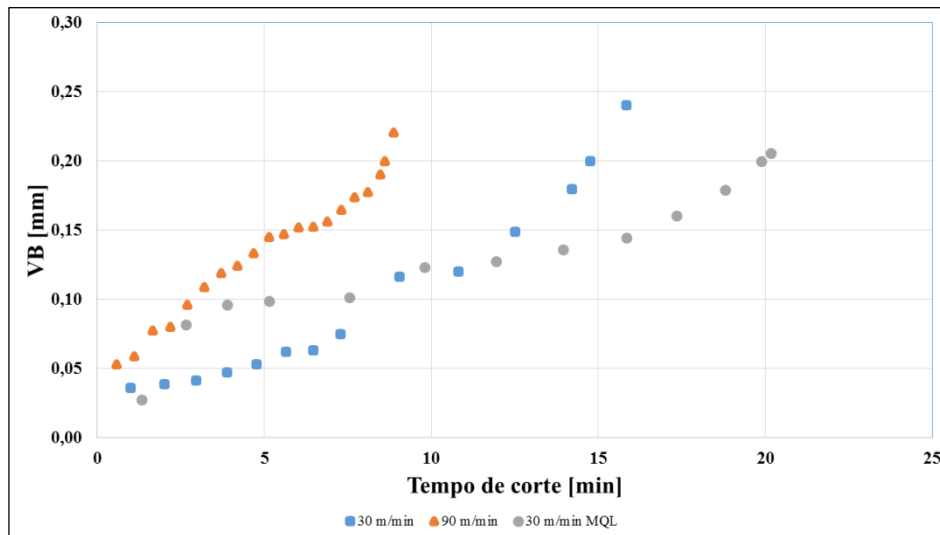
### 4.2.1 Medição do desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta de corte é um parâmetro importante na determinação da vida da ferramenta, e consequente escolha do momento certo de a trocar, como já foi referido. O desgaste foi medido na face de saída da ferramenta, sendo estabelecido um critério de paragem para  $V_B=0,20$  mm.

Tal como para outros critérios de maquinabilidade, como tipo de aparas, forças de corte ou rugosidade superficial, os parâmetros de corte utilizados têm influência direta no desgaste das ferramentas de corte. Segundo a equação de Taylor, Equação 1, a velocidade de corte é o parâmetro que tem maior influência no tempo de vida da ferramenta. Com o uso de MQL, é pretendido caracterizar a influência da maquinagem sustentável na vida das ferramentas de corte. Por outro lado, foi ainda avaliado, separadamente, o efeito do avanço e da profundidade de corte no desgaste das ferramentas.

#### 4.2.1.1 Influência da velocidade de corte e MQL no desgaste da ferramenta de corte

De modo a avaliar a influência da velocidade de corte e lubrificação MQL no desgaste da ferramenta de corte, a Figura 52 mostra a evolução do desgaste ( $V_B$ ) em função do tempo de corte na maquinagem da liga em estudo, para a ferramenta usada.



**Figura 52** - Evolução  $V_B$  em função do tempo de corte para as velocidades de 30 e 90 m/min, a seco e com MQL, usando  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm.

Observando a Figura 52, verifica-se que um aumento da velocidade de corte provoca um maior desgaste na ferramenta, para toda a gama do tempo de corte. Por sua vez, um maior tempo de corte também fará aumentar o desgaste, verificando-se isso para todos os parâmetros testados.

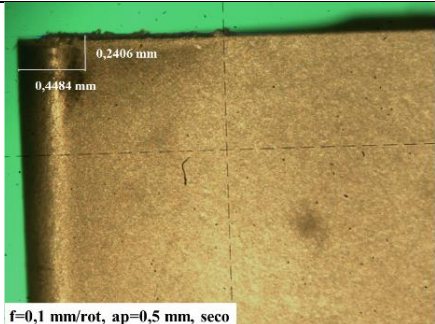
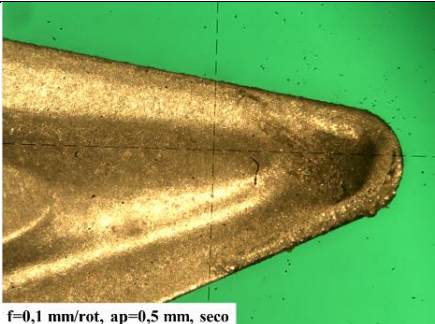
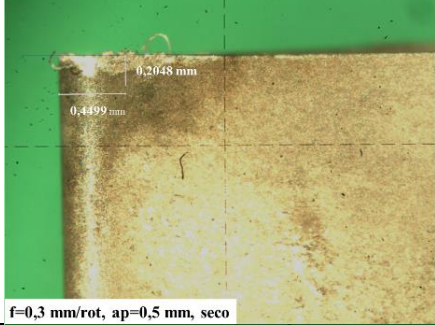
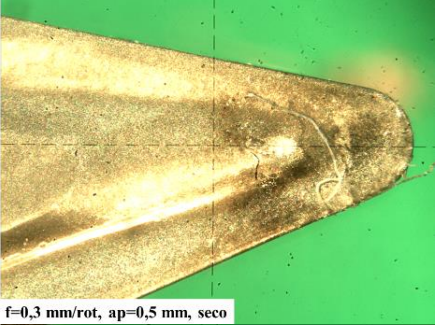
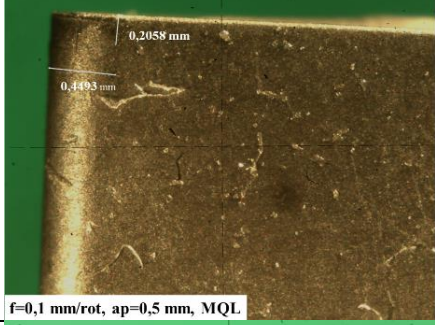

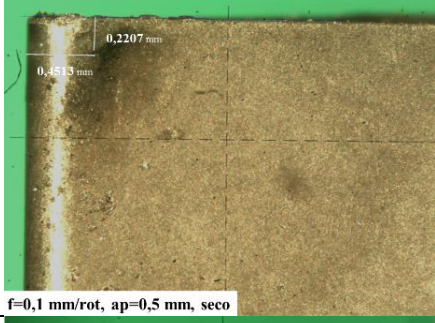
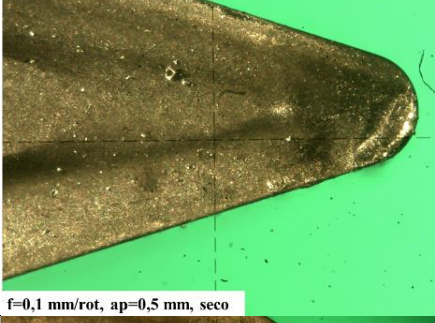
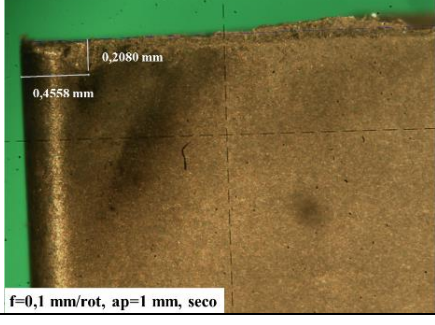
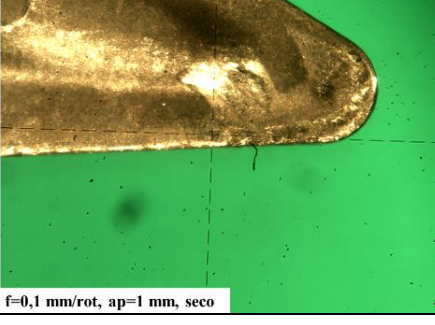
Relativamente à utilização de lubrificação MQL é notório que induz um maior tempo de corte para a ferramenta, dando-se um aumento de cerca de 35% relativamente à maquinagem a seco, para os mesmos parâmetros de corte.

Das três curvas obtidas, é visível a existência de três fases da vida de uma pastilha, em que inicialmente se dá um desgaste relativamente acentuado até a pastilha tornar a sua aresta de corte mais arredondada, sendo que numa segunda fase o desgaste aumenta de uma forma gradual e previsível. Por fim, quando o  $V_B$  for de uma ordem de grandeza crítica, o desgaste volta a aumentar muito rapidamente.

A Tabela 19 mostra o aspeto final da face de saída e ataque da ferramenta de corte usada durante os ensaios experimentais, com e sem lubrificação, para as velocidades de corte de 30 e 90 m/min. Da análise da figura repara-se que, para os ensaios experimentais com  $V_c=30$  m/min,  $a_p=0,5$  mm e  $f=0,3$  mm/rot e  $V_c=90$  m/min,  $a_p=1$  mm e  $f=0,1$  mm/rot, o desgaste na face de ataque, principalmente, é mais acentuado em comparação com os restantes ensaios experimentais.

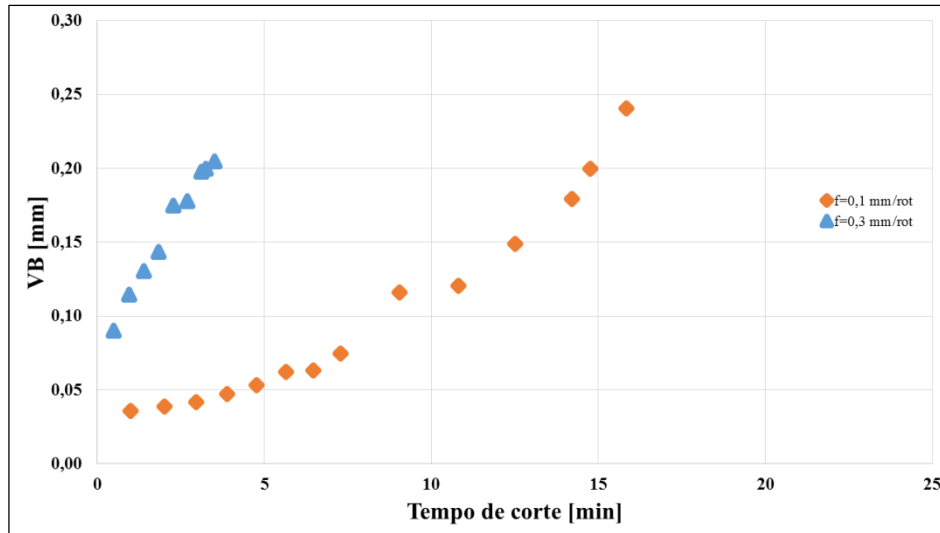


**Tabela 19** - Desgaste da ferramenta de corte, face de saída e ataque, observado ao microscópio ótico, referente a todos os parâmetros de corte utilizados.

Vc [m/min]	Face de saída	Face de ataque
30	 <p>0.2406 mm 0.4484 mm</p> <p>f=0,1 mm/rot, ap=0,5 mm, seco</p>	 <p>f=0,1 mm/rot, ap=0,5 mm, seco</p>
	 <p>0.2048 mm 0.4499 mm</p> <p>f=0,3 mm/rot, ap=0,5 mm, seco</p>	 <p>f=0,3 mm/rot, ap=0,5 mm, seco</p>
	 <p>0.2058 mm 0.4493 mm</p> <p>f=0,1 mm/rot, ap=0,5 mm, MQL</p>	 <p>f=0,1 mm/rot, ap=0,5 mm, MQL</p>
90	 <p>0.2207 mm 0.4513 mm</p> <p>f=0,1 mm/rot, ap=0,5 mm, seco</p>	 <p>f=0,1 mm/rot, ap=0,5 mm, seco</p>
	 <p>0.2080 mm 0.4558 mm</p> <p>f=0,1 mm/rot, ap=1 mm, seco</p>	 <p>f=0,1 mm/rot, ap=1 mm, seco</p>

#### 4.2.1.2 Influência do avanço no desgaste da ferramenta de corte

Segundo a equação de Taylor, o avanço não é uma variável de entrada na obtenção do tempo de vida de uma ferramenta. No entanto, a Figura 53 mostra a evolução do desgaste da ferramenta de corte para duas velocidades de avanço, 0,1 e 0,3 mm/rot, usando  $V_c=30$  m/min e  $a_p=0,5$  mm, para maquinagem a seco.

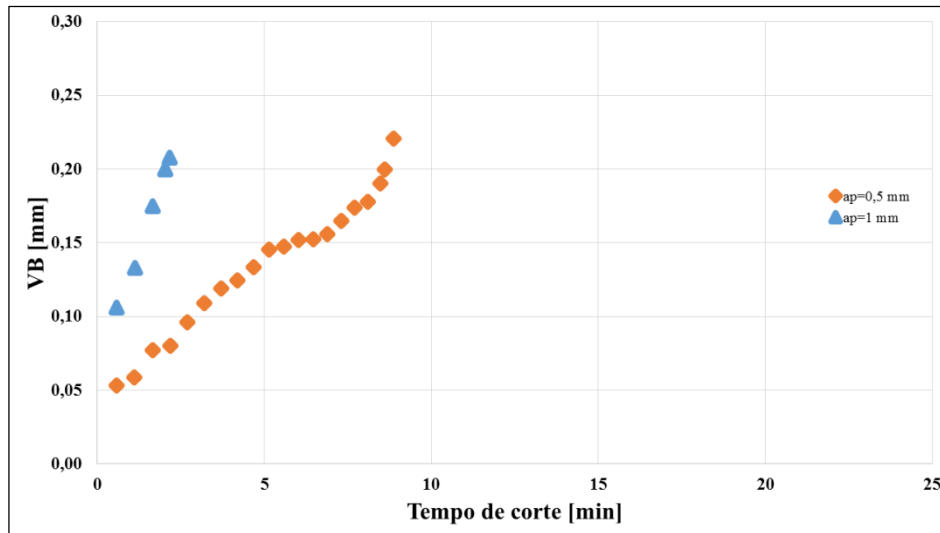


**Figura 53** - Evolução do  $V_B$  em função do tempo de corte para diferentes avanços, usando  $V_c=30$  m/min e  $a_p=0,5$  mm.

É importante retirar da análise da Figura 53 que o aumento do avanço por si só, mantendo os restantes parâmetros de corte constantes, diminui significativamente o tempo de corte da ferramenta, para o mesmo desgaste. Neste sentido, para um  $V_B$  de 0,2 mm, com um avanço de 0,1 mm/rot, foi conseguido cerca de 15 minutos de tempo de corte para  $V_c=30$  m/min e  $a_p=0,5$  mm, já para 0,3 mm/rot de avanço, esse tempo reduziu-se para 3,5 minutos, aproximadamente.

#### 4.2.1.3 Influência da profundidade de corte no desgaste da ferramenta de corte

Assim como o avanço, a profundidade de corte não é um dos parâmetros que tem influência direta no desgaste das ferramentas, segundo a equação de Taylor. A Figura 54 mostra a evolução do seu desgaste para duas profundidades de corte, 0,5 e 1 mm, usando  $V_c=90$  m/min e  $f=0,1$  mm/rot, para maquinagem a seco.



**Figura 54** - Evolução do  $V_B$  em função do tempo de corte para diferentes profundidades de corte, usando  $V_c=90$  m/min e  $f=0,1$  mm/rot.

O efeito da profundidade de corte no desgaste das ferramentas segue o mesmo princípio do aumento do avanço, ou seja, para maiores profundidades o desgaste aumenta, como mostra a Figura 54. Na mesma figura é possível observar que para  $a_p=0,5$  mm, o tempo de corte até se atingir  $V_B=0,2$  mm é de 8,5 min, aproximadamente, ao passo que para  $a_p=1$  mm, mantendo os restantes parâmetros constantes, o tempo de corte diminui para 2 min. Para a maior profundidade de corte testada (1mm) o valor de  $V_B=0,2$  mm é atingido em muitas menos passagens da ferramenta no provete de ensaios, em comparação com o uso de  $a_p=0,5$  mm.

#### 4.2.1.4 Vida da ferramenta de corte

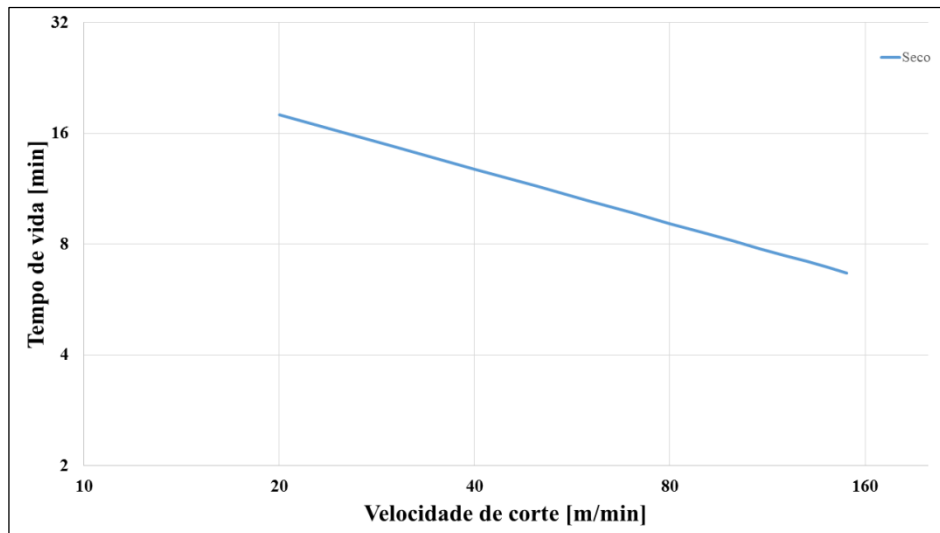
Por forma a determinar a curva de vida da ferramenta, usando a Equação 1, foram adquiridos dados que permitissem essa determinação, como mostra a Tabela 20. O tempo até ser atingido um  $V_B=0,2$  mm foi medido em cada passagem da ferramenta na peça, sendo o tempo total a soma do tempo de cada passagem. Os dados recolhidos são referentes a todos os parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos.

**Tabela 20** – Tempo de vida da ferramenta usada nos ensaios, para todos os parâmetros de corte usados.

Ferramenta	$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/rot]	$a_p$ [mm]	$V_B$ [mm]	Lubrificação	T [min]
S15	30	0,1	0,5	0,2	Seco	14,75
					MQL	19,87
		0,3			Seco	3,25
	90	0,1	0,5		Seco	8,60
			1			2,04



Recorrendo aos dados da Tabela 20, foi realizada a curva de vida da ferramenta de corte utilizada. A Figura 55 mostra essa mesma curva, em escala logarítmica, para o intervalo de velocidades de corte utilizadas nos ensaios experimentais.



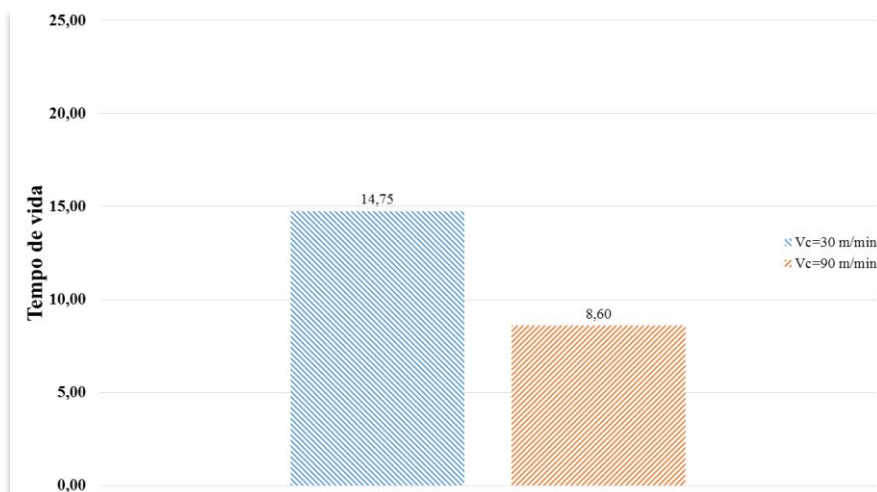
**Figura 55** – Representação da vida da ferramenta de corte para maquinagem a seco.

Através da determinação dos tempos de vida pela Equação 1, e da sua representação gráfica em função da velocidade de corte, é possível mostrar, recorrendo à Figura 55, que a velocidade de corte tem uma influência significativa nesse mesmo tempo, reduzindo-o à medida que a velocidade aumenta, para a gama de velocidades experimentadas. Se para uma  $V_c=20$  m/min é expectável um tempo de vida de 17 min, para  $V_c=150$  m/min esse tempo reduz-se significativamente para 7 min aproximadamente, para a maquinagem a seco.

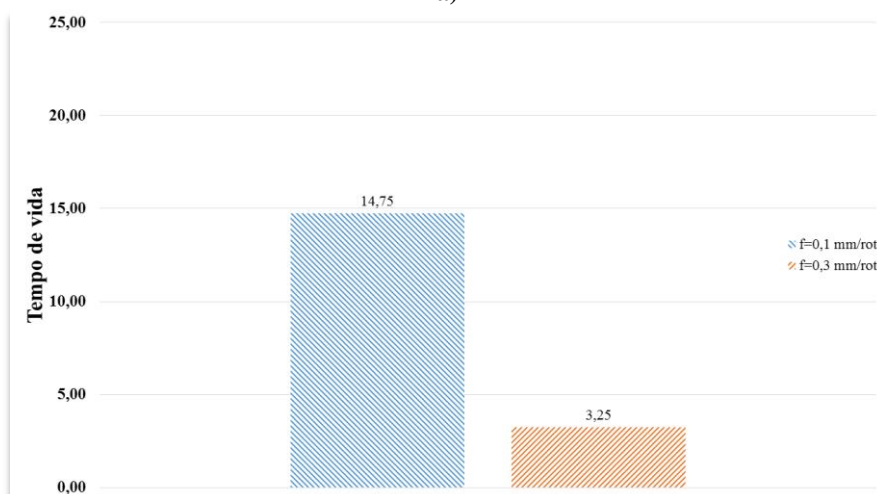
Recorrendo ainda à Tabela 20, e partindo da Equação 1, chega-se à determinação das constantes da equação de Taylor para os parâmetros de teste ensaiados na presente dissertação, obtendo-se a Equação 5 que mostra a vida útil da ferramenta de corte para a maquinagem a seco:

$$T \times V_c^{0,4911} = 78,3686 \quad (5)$$

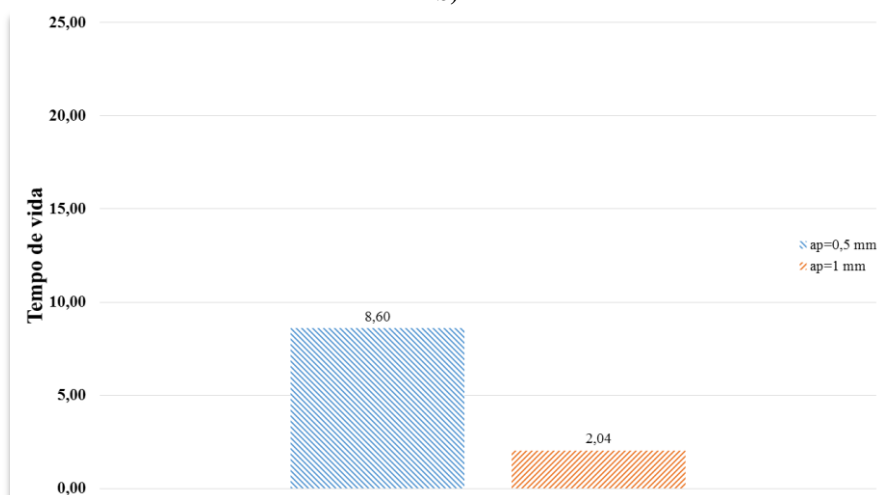
Com a Figura 55 e a Equação 5 é apenas possível determinar, de uma forma precisa, a vida útil da ferramenta de corte para os casos em que o avanço e a profundidade de corte seja 0,1 mm/rot e 0,5 mm, respetivamente. Perante isto, a Figura 56 mostra uma comparação do tempo de vida obtido para todas as condições de corte utilizadas nos ensaios de corte longos.



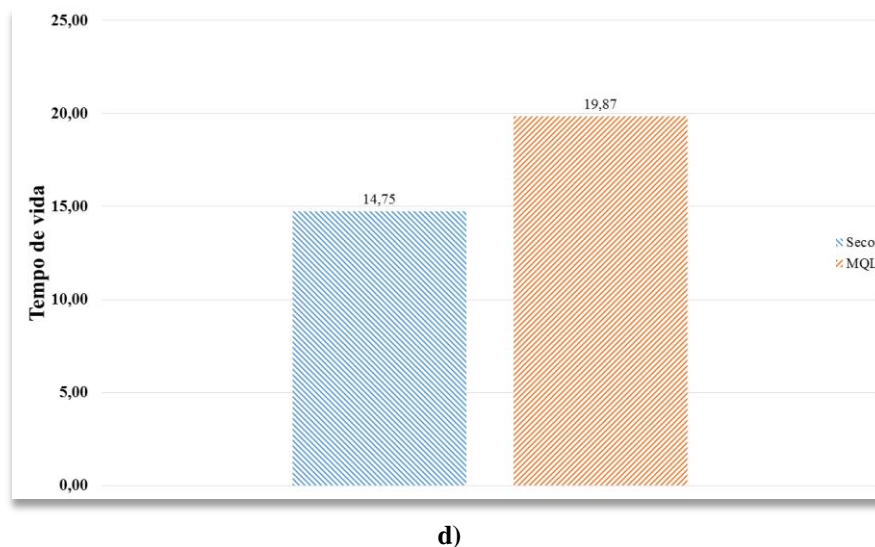
a)



b)



c)



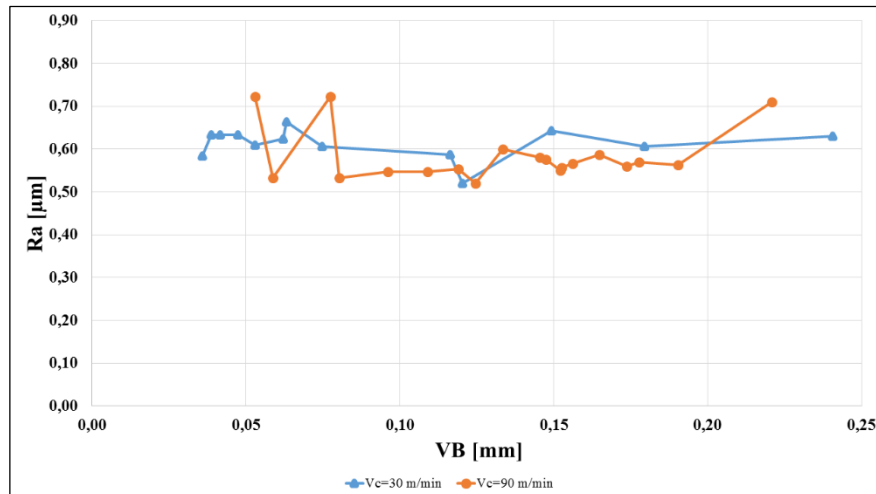
**Figura 56** – Comparação do tempo de vida para: a) diferentes velocidades de corte (30 e 90 m/min), b) diferentes avanços (0,1 e 0,3 mm/rot), c) diferentes profundidades de corte (0,5 e 1 mm), d) seco e com MQL.

Da análise da Figura 56 retira-se que a variação da velocidade de corte, do avanço, da profundidade de corte e do tipo de lubrificação, alteram o tempo de vida da ferramenta de corte. O tempo máximo obtido verificou-se com o recurso a lubrificação por MQL, aumentando em cerca de 35% o tempo de vida em comparação com o uso dos mesmos parâmetros de corte sem lubrificação. Já o mínimo do tempo de vida verificou-se para o ensaio com a maior profundidade de corte (1 mm), a seco. O aumento do tempo de vida da ferramenta com MQL remete para outro dos possíveis benefícios do uso de maquinagem sustentável na maquinagem das ligas de titânio, para além da diminuição das forças de corte e da rugosidade superficial.

#### 4.2.2 Medição da rugosidade e acabamento superficial

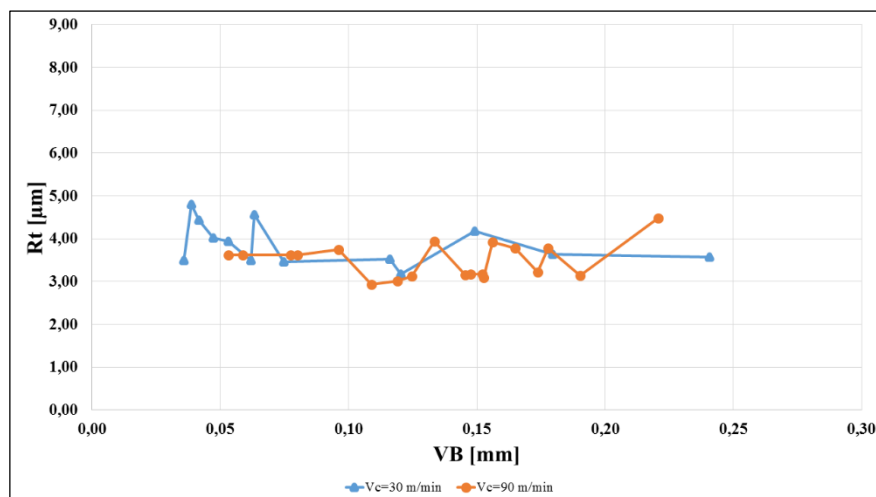
Nesta secção são apresentados os resultados da rugosidade superficial obtida nos ensaios de corte longos. Sendo que na secção 4.1.3 foi analisada a evolução da rugosidade superficial para os diferentes parâmetros de corte, neste tópico é realçada a rugosidade em função do desgaste na face de saída da ferramenta de corte.

A Figura 57 mostra a evolução da  $R_a$  em função do  $V_B$ , para a  $V_c=30$  m/min e  $V_c=90$  m/min. É visível através da figura que a  $R_a$  não varia de forma linear com o aumento do desgaste na face de saída da ferramenta de corte. Inicialmente, quando se usa uma pastilha nova, a  $R_a$  para  $V_c=30$  m/min e  $V_c=90$  m/min toma valores experimentais mais elevados, sendo que quando atinge um  $V_B=0,07$  mm, aproximadamente, o valor da rugosidade tende a diminuir até cerca de  $V_B=0,13$  mm, voltando depois a aumentar à medida que o desgaste da pastilha aumenta.



**Figura 57** – Evolução da Ra em função do  $V_B$  para  $V_c=30$  m/min e  $V_c=90$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, a seco.

A Figura 58 mostra a evolução da  $R_t$  em função do  $V_B$ , para a  $V_c=30$  m/min e  $V_c=90$  m/min. Tal como acontece para a  $R_a$ , a  $R_t$  percorre uma evolução semelhante. Para as duas velocidades de corte testadas, 30 e 90 m/min, os resultados são semelhantes, sendo que os valores mínimos de  $R_t$  se obtêm para  $V_B=0,12$  mm, aproximadamente, e os valores máximos na fase inicial do corte.



**Figura 58** - Evolução da  $R_t$  em função do  $V_B$  para  $V_c=30$  m/min e  $V_c=90$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, a seco.

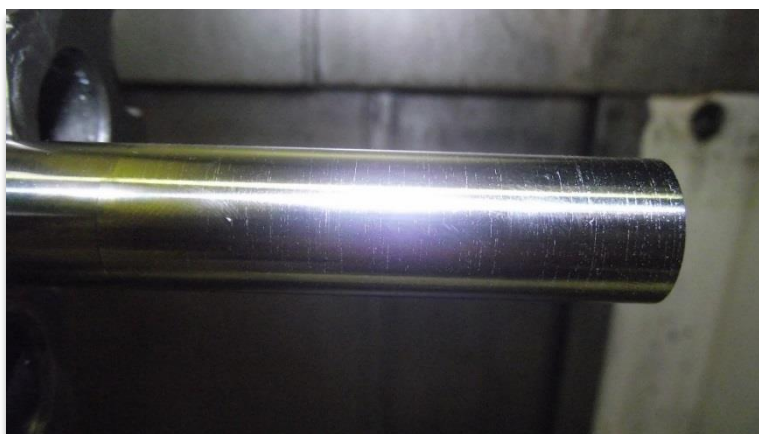
O ensaio de corte longo com  $V_c=30$  m/min,  $f=0,3$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, merece também destaque pela alta rugosidade superficial apresentada. A Figura 59 mostra o aspeto final do provete para este parâmetro de corte.



**Figura 59** - Aspeto final do provete para  $V_c=30$  m/min,  $f=0,3$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm.

Pela visualização da Figura 59 é perceptível o mau acabamento, e consequente alta rugosidade superficial do provete para o  $f=0,3$  mm/rot. Dado o aspeto final, foi decidido não avaliar o valor real da rugosidade, uma vez que este poderia por em causa o bom funcionamento do rugosímetro, nomeadamente da agulha de apalpação. No entanto, recorrendo às equações teóricas 2 e 3, estima-se que o valor da  $R_t=28,13$   $\mu\text{m}$  e  $R_a=7,03$   $\mu\text{m}$ . Isto permite-nos, experimentalmente, concluir que elevados avanços têm influência direta na alta rugosidade superficial.

Nos ensaios longos é ainda perceptível o efeito que a evacuação da aparta pode ter na rugosidade. A Figura 60 permite visualizar o aspeto final do provete depois de evacuada a aparta, onde é possível verificar a ocorrência de pequenos riscos que influenciarão a rugosidade e precisão dimensional. Prevê-se que estes riscos sejam responsáveis pelos picos de  $R_t$  obtidos em alguns ensaios experimentais, como é o caso da maquinagem com  $V_c=60$  m/min,  $a_p=0,5$  mm e  $f=0,05$  mm/rot, como mostra a Figura 47. O MQL tem também neste aspeto uma importância acrescida, uma vez que ajuda à evacuação da aparta, e assim minimiza o efeito desta na rugosidade obtida.



**Figura 60** - Efeito da difícil evacuação da aparta no aspeto final do provete, nos ensaios a seco.



---

# Capítulo 5

---

Conclusões

---





## 5. CONCLUSÕES

Os ensaios experimentais em torneamento foram realizados na liga de titânio Ti-6Al-7Nb, utilizando uma ferramenta de metal duro, de classe S15, sem revestimento e com quebra-aparas.

Os ensaios realizados foram divididos em ensaios de corte curtos e longos. Nos ensaios curtos procedeu-se à análise da apara obtida para os parâmetros de corte testados, medição das forças de corte através de dinamómetro e avaliação da rugosidade superficial, recorrendo a um rugosímetro.

Nos ensaios de corte longos, foi realizada a avaliação do desgaste da ferramenta, para diferentes parâmetros de corte e da rugosidade superficial, em função do tempo de corte. A análise do desgaste da ferramenta de corte ( $V_{Bmáx}$ ) permitiu determinar o tempo de vida. Com estes dados foi representada a curva de vida da ferramenta, segundo a equação de Taylor.

Tanto nos ensaios curtos como longos, foi analisado o efeito do MQL. Para os curtos foi avaliado esse efeito na apara obtida, nas forças de corte e rugosidade superficial, já nos longos deu-se essencialmente no desgaste da ferramenta de corte.

Com base dos resultados obtidos e descritos no capítulo 4 da presente dissertação, são apresentadas as seguintes conclusões:

### Ensaio de corte curtos:

- I. As aparas obtidas para todos os parâmetros de corte testados são essencialmente do tipo 4 (helicoidal em gume), em que para os testes a seco com  $f=0,05$  mm/rot e  $a_p=0,25$  mm têm uma forma enrolada (4.3) e as restantes forma longa (4.1);
- II. As três componentes da força de corte são maiores para menores velocidades de corte, maiores avanços e maiores profundidades de corte, sendo a  $F_c$  a de maior magnitude no processo de torneamento. O máximo atingido foi de 179 N para  $V_c=30$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, usando pastilhas desgastadas;
- III. Com ferramentas desgastadas, as forças de corte são mais elevadas, atingindo uma diferença máxima de 55%;
- IV. O uso de MQL reduz as forças de corte até 20% em comparação com a maquinagem a seco;
- V. O aumento do avanço provoca um aumento da  $R_a$ , ao passo que a profundidade de corte e a velocidade têm pouca influência;
- VI. O avanço é o parâmetro que tem mais influência no IT, sendo que para  $f=0,05$  mm/rot o IT situa-se entre IT5 (9  $\mu$ m) e IT7 (21  $\mu$ m), pertencente a torneamento em acabamento. Já para  $f=0,1$  mm/rot o IT está compreendido entre IT7 (21  $\mu$ m) e IT8 (33  $\mu$ m), torneamento geral;
- VII. O uso de MQL mostrou bons resultados na redução dos valores de  $R_a$  e  $R_t$  em comparação com a maquinagem a seco.

#### Ensaaios de corte longos:

- I. O tempo de vida da ferramenta de metal duro utilizada é menor para velocidades maiores, sendo que para  $V_c=30$  m/min esse tempo (14,75 min) é aproximadamente o dobro do que com  $V_c=90$  m/min (8,60 min), até atingir o critério de vida  $V_{Bmáx}=0,2$  mm;
- II. O uso de MQL aumenta o tempo de corte da ferramenta, passando de 14,75 para 19,87 minutos com  $V_c=30$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, usando maquinagem a seco e MQL, respetivamente;
- III. O aumento do avanço e da profundidade de corte têm um efeito negativo no tempo de vida da ferramenta;
- IV. Com pastilhas novas, as  $R_a$  e  $R_t$  aumentam ligeiramente no início do corte até se atingir  $V_B=0,07$  mm, aproximadamente, sendo que a partir daí e até  $V_B=0,13$  mm atingem o mínimo de rugosidade, aumentando de seguida com o aumento do desgaste da ferramenta.

Através dos resultados obtidos nos ensaios experimentais mostrou-se que é possível maquinar a liga Ti6Al7Nb com recurso à maquinagem sustentável, obtendo assim valores experimentais favoráveis, como é o caso da redução das forças de corte, bom acabamento superficial e aumento do tempo de vida da ferramenta de corte. Baseando-se nestes critérios, é recomendada a maquinagem desta liga com recurso a lubrificação por MQL.

#### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Dado o reduzido número de ensaios experimentais sobre a maquinagem desta liga, e sendo que a empregabilidade deste material na indústria tem vindo a crescer de dia para dia, seria interessante, como trabalhos futuros, abordar os seguintes tópicos:

- I. Expandir a gama de parâmetros de corte utilizada nos ensaios experimentais;
- II. Testar outro tipo de ferramentas de corte, nomeadamente de PCD;
- III. Realizar testes com lubrificação por emulsão e a ar para comparar com lubrificação por MQL;
- IV. Medir as temperaturas de corte;
- V. Medir as tensões residuais para avaliar a integridade superficial;
- VI. Realizar simulações numéricas com os mesmos parâmetros testados experimentalmente e comparar resultados.

---

# Capítulo 6

---

Referências bibliográficas

---



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRAZOLA, PJ; GARAY, A.; IRIARTE, LM - Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). *Journal of Materials Processing Technology*. 210 (2009) 197–203.

BARRY, J.; BYRNE, G.; LENNON, D. - Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti–6Al–4V alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. . ISSN 08906955. 41:7 (2001) 1055–1070. doi: 10.1016/S0890-6955(00)00096-1.

BOMBAC, David *et al.* - Review of materials in medical applications Pregled materialov v medicinskih aplikacijah. *Materials and Geoenvironment*. 54:4 (2007) 471–499.

BOYER, RR - An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*. A213:1-2 (1996) 103–114.

BREME, J.; EISENBARTH, E.; BIEHL, V. - Titanium and its alloys for medical applications. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. 16 (2003) 423–451.

ÇALIŞKAN, Halil; KÜÇÜKKÖSE, Meriç - The effect of aCN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V superalloy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. . ISSN 02634368. 50:2015) 304–312. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2015.02.012.

CAROU, D.; RUBIO, EM; DAVIM, JP - A note on the use of the minimum quantity lubrication (MQL) system in turning. *Industrial Lubrication and Tribology*. 67:3 (2015) 256–261.

COLLINGS, EW - The physical metallurgy of titanium alloys. *American Society for Metals*. 1984) 1–197.

CORDUAN, N.; HIMBART, T.; POULACHON, G. - Wear mechanisms of new tool materials for Ti-6Al-4V high performance machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 52:1 (2003) 73–76.

DAVIM, J. P. - *Princípios da Maquinagem*. Portugal : Publindústria, 2008

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, Mahiuddin - Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. . ISSN 09240136. 172:2 (2006) 299–304. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022.

DHAR, NR *et al.* - The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 171:1 (2006) 93–99.

DHAR, NR; AHMED, MT; ISLAM, S. - An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools and manufacture*. 47:5 (2007) 748–753.

DONACHIE, Matthew J. - *Titanium: A Technical Guide*, 2nd Edition [Em linha] [Consult. 25 fev. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=HgzukknbnGAC&pgis=1>>. ISBN 161503062X.

DONACHIE, MJ - *Titanium and Titanium alloys: source book: a collection of outstanding articles from the technical literature*. 1982).

EISENBARTH, E. *et al.* - Cell orientation and cytoskeleton organisation on ground titanium surfaces. *Biomolecular Engineering*. . ISSN 13890344. 19:2-6 (2002) 233–237. doi: 10.1016/S1389-0344(02)00028-X.

EL-SONBATY, I.; KHASHABA, U. A.; MACHALY, T. - Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Composite Structures*. . ISSN 02638223. 63:3-4 (2004) 329–338. doi: 10.1016/S0263-8223(03)00181-8.

EM10TAQUE - 10 aplicações da tecnologia no desporto [Em linha], atual. 2013. [Consult. 19 mar. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.em10taque.com/help10k/10-aplicacoes-da-tecnologia-no-desporto/>>.

EZUGWU, E. O. - Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. . ISSN 08906955. 45:12-13 (2005) 1353–1367. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. - Titanium alloys and their machinability - A review. *Journal of Materials Processing Technology*. . ISSN 09240136. 68:3 (1997) 262–274.

EZUGWU, EO; LAI, CJ - Failure modes and wear mechanisms of M35 high-speed steel drills when machining inconel 901. *Journal of Materials Processing Technology*. 49:3-4 (1995) 295–312.

EZUGWU, EO; SILVA, RB Da - Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 45:9 (2005) 1009–1014.

FANG, N. - Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool. *Wear*. 258:5-6 (2005) 890–897.

GAITONDE, Vinayak N.; KARNIK, Ramesh S.; DAVIM, J. Paulo - Minimum Quantity Lubrication in Machining. Em DAVIM, J. PAULO (Ed.) - *Sustainable Manufacturing*. [S.l.] : Wiley, 2010. p. 79–110.

GAO, Yanfeng *et al.* - Cutting force, chip formation, and tool wear during the laser-assisted machining a near-alpha titanium alloy BTi-6431S. *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology. . ISSN 0268-3768. 2015). doi: 10.1007/s00170-015-6917-5.

GROOVER, MP Mikell P. MP - Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems [Em linha]. [S.l.] : John Wiley & Sons, 2010 [Consult. 9 abr. 2015]. ISBN 0470467002.

HARTUNG, PD; KRAMER, BM; TURKOVICH, BF Von - Tool wear in titanium machining. CIRP Annals-Manufacturing Technology. 31:1 (1982) 75–80.

HUGHES, JI - The effect of cutting tool material and edge geometry on tool life and workpiece surface integrity. Journal of Engineering Manufacture. 220:2 (2006) 93–107.

KARAGUZEL, U. *et al.* - Increasing tool life in machining of difficult-to-cut materials using nonconventional turning processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. . ISSN 0268-3768. 77:9-12 (2014) 1993–2004. doi: 10.1007/s00170-014-6588-7.

KHAN, M. A.; WILLIAMS, R. L.; WILLIAMS, D. F. - The corrosion behaviour of Ti–6Al–4V, Ti–6Al–7Nb and Ti–13Nb–13Zr in protein solutions. Biomaterials. . ISSN 01429612. 20:7 (1999) 631–637. doi: 10.1016/S0142-9612(98)00217-8.

KHANNA, Navneet; DAVIM, J. P. - Design-of-experiments application in machining titanium alloys for aerospace structural components. Measurement. . ISSN 02632241. 61:2015) 280–290. doi: 10.1016/j.measurement.2014.10.059.

KIKUCHI, Masafumi; OKUNO, Osamu - Machinability Evaluation of Titanium Alloys. Dental Materials Journal. . ISSN 1881-1361. 23:1 (2004) 37–45. doi: 10.4012/dmj.23.37.

KOMANDURI, R.; REED, WR - Evaluation of carbide grades and a new cutting geometry for machining titanium alloys. Wear. 92:1 (1983) 113–123.

KOSAKA, Y.; FANNING, JC; FOX, SP - Development of low cost high strength alpha/beta alloy with superior machinability. Proceedings of the 10th World Conference on Titanium. 2004).

LAING, PG - Tissue reaction in rabbit muscle exposed to metallic implants. Journal of Biomedical Materials Research. 1:1 (1967) 135–149.

LAURO, C. H. *et al.* - Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review. Measurement. . ISSN 02632241. 58:2014) 73–86. doi: 10.1016/j.measurement.2014.08.035.

LIU, ZhiQiang *et al.* - A coupling method of response surfaces (CRSM) for cutting parameters optimization in machining titanium alloy under minimum quantity lubrication (MQL) condition. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. . ISSN 2234-7593. 14:5 (2013) 693–702. doi: 10.1007/s12541-013-0093-z.

MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. - Machining of titanium and its alloys—a review. ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 1989-1996 (vols 203-210). . ISSN 0954-4054. 204:12 (1990) 53–60. doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1990\_204\_047\_02.

MACHADO, ÁR *et al.* - Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Editora Blucher. 1:1 (2009) 53–55.

MATTEI, L. *et al.* - Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review. Tribology International. 44:5 (2011) 532–549.

MERCHANT, ME - An interpretive look at 20th century research on modeling of machining. Machining Science and Technology. 2:2 (1998) 157–163.

MORAIS, S. - Desenho técnico básico 3. Porto Editora. 2:26 (2012).

MUHAMMAD, Riaz *et al.* - Analysis of a free machining  $\alpha+\beta$  titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning. Journal of Materials Processing Technology. . ISSN 09240136. 214:4 (2014) 906–915. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.002.

MURTHY, K. Sundara; RAJENDRAN, I. - Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. . ISSN 1678-5878. 34:3 (2012) 253–261. doi: 10.1590/S1678-58782012000300005.

NABHANI, Farhad - Machining of aerospace titanium alloys. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. . ISSN 07365845. 17:1-2 (2001) 99–106. doi: 10.1016/S0736-5845(00)00042-9.

NELSON, OE - The Product Life Cycle of Titanium. Annual Conference of the Titanium Development Association. 1989).

Norma ISO 3685, "Tool -life testing single-point turning tools, 2. Ed",1993.

NOUARI, M.; MAKICH, H. - On the Physics of Machining Titanium Alloys: Interactions between Cutting Parameters, Microstructure and Tool Wear. Metals. 4:3 (2014) 335–358.

ORTOPÉDICOS, IOL IMPLANTES - Parafuso Canulado 4,5mm Titânio - Rosca Curta [Em linha], atual. 2015. [Consult. 19 mar. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.iolimplantes.com.br/produto.php?p=parafuso-canulado-4,5mm-titanio---rosca-curta->>.

ÖZEL, T. *et al.* - Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti–6Al–4V alloy with experiments and finite element simulations. CIRP Annals-Manufacturing Technology. 59:1 (2010) 77–82.



PERVAIZ, Salman *et al.* - Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*. . ISSN 1042-6914. 29:3 (2014) 219–252. doi: 10.1080/10426914.2014.880460.

PETERS, M. - Structure and properties of titanium and titanium alloys. *Titanium and Titanium Alloys*. 2003).

PRAMANIK, A. - Problems and solutions in machining of titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. . ISSN 0268-3768. 70:5-8 (2013) 919–928. doi: 10.1007/s00170-013-5326-x.

RAHMAN, Mustafizur; WONG, Yoke San; ZAREENA, A. Rahmath - Machinability of Titanium Alloys. *JSME International Journal Series C*. . ISSN 1344-7653. 46:1 (2003) 107–115. doi: 10.1299/jsmec.46.107.

RAZA, SW; PERVAIZ, S.; DEIAB, I. - Tool wear patterns when turning of titanium alloy using sustainable lubrication strategies. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 15:9 (2014) 19791985.

SANDVIK COROMANT - Turning tools

SEMLITSCH, MF *et al.* - Joint replacement components made of hot-forged and surface-treated Ti-6Al-7Nb alloy. *Biomaterials*. 13:11 (1992) 781–788.

SHAW, MC - Historical Aspects Concerning Removal Operations on Metals, 2nd Int Conf on Materials: Metal Transformations, Gordon and Breach. 1968).

SHAW, MC - Metal cutting principles, 1984. Clarendon Press, Oxford. 1984).

SREDANOVIC, B.; GLOBOCKI-LAKIC, G. - Influence of Different Cooling and Lubrication Techniques on Material Machinability in Machining. *Journal of Mechanical Engineering*. 59:12 (2013) 748–754.

STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. - Metal Cutting Theory and Practice [Em linha] [Consult. 2 mar. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=PvK72Ymaj10C&pgis=1>>. ISBN 0824758889.

STOETERAU, Rodrigo Lima - Processos de Usinagem [Em linha], atual. 2004. [Consult. 8 abr. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<http://pt.slideshare.net/StfanoBellote/apostila-usinagem-lmp>>.

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. - Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. . ISSN 08906955. 49:7-8 (2009) 561–568. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.

SUN, S.; BRANDT, M.; MO, JPT - Evolution of tool wear and its effect on cutting forces during dry machining of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Engineering Manufacture*. 228:2 (2014) 191–202.

Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications - [Em linha]. [S.l.] : John Wiley & Sons, 2006 [Consult. 25 fev. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<https://books.google.com/books?id=Zq3xMa-IOvMC&pgis=1>>. ISBN 3527605207.

TSUYA DESIGN - Rodas Esportivas Tsuya HRS HYPER TITÂNIO, atual. 2015.

UNIST AUSTRALIA - Unist Australia - Unist MQL: The Future of Metal Cutting Fluid [Em linha], atual. 2015. [Consult. 16 abr. 2015]. Disponível em WWW:<URL:<http://unist.com.au/what-is-mql.html>>.

VEIGA, C.; DAVIM, JP; LOUREIRO, AJR - Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 32:2012) 133–148.

VELÁSQUEZ, JDP; TIDU, A.; BOLLE, B. - Sub-surface and surface analysis of high speed machined Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 527:10-11 (2010) 2572–2578.

WANG, Zhigang; NAKASHIMA, Shogo; LARSON, Mark - Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration. *Procedia CIRP*. . ISSN 22128271. 17:2014) 523–528. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.134.

WANG, ZM; EZUGWU, EO - Performance of PVD-Coated Carbide Tools When Machining Ti-6Al-4V©. *Tribology transactions*. 40:1 (1997) 81–86.

WEISS, I. *et al.* - Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing: Proceedings of an International Symposium Sponsored by the TMS Titanium and Shaping and. 1997).

WELSCH, G.; BOYER, R.; COLLINGS, EW - Materials properties handbook: titanium alloys. 1993).

---

# Capítulo 7

---

Anexos

---



## **ANEXO I**

Certificado da qualidade da liga  
de titânio Ti6Al7Nb (Cortesia  
*Tifast S.R.L.*)



# TiFast

## QUALITY CERTIFICATE

DATE: 13 DECEMBER 2012

TiFAST S.R.L.

Zona Industriale San Liberato - 05035 NARNI (TR) ITALY

Tel: +39 0744 7361 Fax: +39 0744 742 260

email: info@tifast.com http://www.tifast.com

HEAT NUMBER **GV20928** ALLOY

MATERIAL **Bars** SPECIFICATION

**Ti-6Al-7Nb, UNS R56700**

**ISO 5832-11:94, ASTM F1295-05**

TEST ORDER

CUSTOMER

REFERENCE

### CHARACTERISTICS OF THE SUPPLY (NOMINAL)

Diameter	Length	Weight Kg	Surface Finish	Tolerance	Surface roughness
<b>25,000 mm</b>	<b>2800,00 - 3200,00 mm</b>	<b>468,000</b>	<b>Pedled,cold polish,belt ground</b>	<b>h9</b>	<b>Ra&lt;1,6 µm</b>

### HEAT CHEMICAL COMPOSITION

	Al %	C %	Fe %	H %	N %	Nb %	O %	Ta %	RES. MAX %	Ti %
STD limits	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,00	Each	TOTAL
	max	0,08	0,25	0,009	0,05	7,50	0,20	0,50	<b>0,10</b>	<b>0,40</b>
GV20928	<b>6,02</b>	<b>0,013</b>	<b>0,16</b>	<b>0,003</b>	<b>0,005</b>	<b>6,83</b>	<b>0,178</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,40</b>
bottom	<b>5,94</b>	<b>0,013</b>	<b>0,15</b>	<b>0,003</b>	<b>0,005</b>	<b>6,90</b>	<b>0,169</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,40</b>

### MECHANICAL / PHYSICAL PROPERTIES OF THE SUPPLIED PRODUCTS

IDENTIFICATION	REFERENCE STANDARD	Tensile Strength MPa	Yield Strength 0,2% offset MPa	Reduction of Area %	Elongation %
<b>GV20928-0/B</b>	<b>ASTM E8/E8M-09, ELONG. ON 4D</b>	<b>995</b>	<b>910</b>	<b>49,6</b>	<b>15,4</b>
<b>GV20928-0/B</b>	<b>ISO 6892:1998 (E), ELONG. ON 5D</b>	<b>995</b>	<b>910</b>	<b>49,6</b>	<b>12,4</b>

Heat Treatment **ANNEALED 750°C 1 H + AIR COOLING**

US Test **100% AMS 2631D CL AA & ETTC 7**

β-Transus Temp **1005±5 °C**

Maximum Camber **1 mm/m**

Microstructure **Alpha-Beta Globular A7 as ETTC2**

Eddy Current Test **No defect, 100% Inspected**

*Radioactive contamination - free material*

Others

**Double vacuum melted, first melt by TiFast (see address on top), VAR melted by Sandvik, Sweden.**

**No Japanese origin. Bars 100% visually inspected. Stress-relieved bars.**

We hereby certify that the relevant material was produced, sampled, inspected and tested in accordance with the customer purchase order and referenced specifications, and conforms to the requirements.  
The present document is in compliance with EN ISO 9001:2008 inspection certificate "Type 3.1". The first seven characters in the IDENTIFICATION give the heat number of the lot. Certified Hydrogen analysis was performed on the supplied product.

The person in Charge of Laboratories

**ING. S. CAVALLARO**

*S. Cavallaro*

COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT  
SYSTEM CERTIFIED BY DNV

**= EN 9100:2003 =**

Manufacturer Inspection Representative

**ING. M. COSTANZI**

*M. Costanzi*

COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT  
SYSTEM CERTIFIED BY DNV

**= ISO 9001:2008 =**





## **ANEXO II**

Principais características do  
Torno CNC utilizado nos ensaios  
práticos



Torno CNC Kingsbury MHP 50	
Contraponto	
Diâmetro	72 mm
Acionamento	Hidráulico
Bucha	
Distância máxima. entre bucha e contraponto	500 mm
Acionamento	Hidráulico
Diâmetro máximo da bucha	200 mm
Posicionamento Rápido dos Eixos	
Eixo X	10 m/min
Eixo Z	10 m/min
Torreta	
Ferramenta de corte (internas e externas)	12 s
Tempo de indexação	1,2 s
Outras características	
Velocidade máxima de rotação	4500 rpm
Potência máxima	25 cv
Controlador	Fanuc séries O-T
Peso	≈4 Ton.
Distância longitudinal (eixo Z)	550 mm
Distância transversal (eixo X)	200 mm



### **ANEXO III**

Valores obtidos nos ensaios  
experimentais, ensaios curtos



**Tabela 21** - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas e MQL.

<b>V<sub>c</sub></b> <b>[m/min]</b>	<b>f</b> <b>[mm/rot]</b>	<b>a<sub>p</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>F<sub>x</sub></b> <b>(máximo)</b>	<b>F<sub>y</sub></b> <b>(máximo)</b>	<b>F<sub>z</sub></b> <b>(máximo)</b>
30	0,1	0,5	77,724	76,087	116,706
30	0,1	0,25	64,350	42,575	72,849
30	0,05	0,5	77,144	96,202	91,936
30	0,05	0,25	50,250	37,958	44,757
60	0,1	0,5	106,577	111,220	143,022
60	0,1	0,25	95,379	106,712	145,306
60	0,05	0,5	82,308	104,085	88,207
60	0,05	0,25	57,832	37,134	45,122
90	0,1	0,5	104,010	108,478	138,580
90	0,1	0,25	73,266	41,080	69,655
90	0,05	0,5	89,975	198,792	133,986
90	0,05	0,25	58,251	38,380	49,299
120	0,1	0,5	99,905	104,876	134,090
120	0,1	0,25	72,750	46,624	69,491
120	0,05	0,5	88,300	168,939	127,959
120	0,05	0,25	58,858	49,88	55,360

**Tabela 22** - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas e MQL.

<b>V<sub>c</sub></b> <b>[m/min]</b>	<b>f</b> <b>[mm/rot]</b>	<b>a<sub>p</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>F<sub>x</sub></b> <b>(máximo)</b>	<b>F<sub>y</sub></b> <b>(máximo)</b>	<b>F<sub>z</sub></b> <b>(máximo)</b>
30	0,1	0,5	133,237	167,618	178,487
30	0,1	0,25	98,516	66,311	92,342
30	0,05	0,5	91,044	156,107	112,614
30	0,05	0,25	75,204	53,209	57,967
60	0,1	0,5	121,852	260,091	197,210
60	0,1	0,25	101,969	68,035	88,901
60	0,05	0,5	66,644	92,574	87,869
60	0,05	0,25	83,348	55,949	57,876
90	0,1	0,5	124,066	128,597	156,435
90	0,1	0,25	102,556	64,000	86,742
90	0,05	0,5	101,848	117,868	100,387
90	0,05	0,25	87,207	60,821	57,178
120	0,1	0,5	119,686	127,524	153,967
120	0,1	0,25	99,430	59,308	86,406
120	0,05	0,5	103,312	119,812	102,278
120	0,05	0,25	84,341	53,746	57,416

**Tabela 23** - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas, a seco.

V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	F <sub>x</sub> (máximo)	F <sub>y</sub> (máximo)	F <sub>z</sub> (máximo)
30	0,1	0,5	85,727	95,683	140,230
30	0,1	0,25	78,576	52,259	90,322
30	0,05	0,5	62,418	80,053	91,013
30	0,05	0,25	52,401	36,653	56,530
60	0,1	0,5	87,915	90,884	138,453
60	0,1	0,25	71,157	42,463	74,510
60	0,05	0,5	66,733	76,324	83,161
60	0,05	0,25	61,729	43,952	55,331
90	0,1	0,5	86,916	92,003	134,194
90	0,1	0,25	65,122	36,716	72,507
90	0,05	0,5	63,907	84,849	87,392
90	0,05	0,25	60,229	41,485	51,305
120	0,1	0,5	83,773	86,719	129,257
120	0,1	0,25	70,321	41,006	73,966
120	0,05	0,5	63,555	78,603	86,353
120	0,05	0,25	51,719	42,581	49,348

**Tabela 24** - Resultados experimentais das forças de corte para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas, a seco.

V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	F <sub>x</sub> (máximo)	F <sub>y</sub> (máximo)	F <sub>z</sub> (máximo)
30	0,1	0,5	129,414	151,636	174,150
30	0,1	0,25	95,121	57,500	84,854
30	0,05	0,5	96,754	146,447	115,904
30	0,05	0,25	70,791	50,221	55,427
60	0,1	0,5	127,264	146,320	161,732
60	0,1	0,25	102,588	60,298	86,751
60	0,05	0,5	99,214	132,288	101,771
60	0,05	0,25	79,633	53,786	57,588
90	0,1	0,5	122,745	143,280	159,334
90	0,1	0,25	69,487	39,348	73,477
90	0,05	0,5	96,009	125,642	99,104
90	0,05	0,25	81,937	54,401	56,220
120	0,1	0,5	117,888	134,741	152,350
120	0,1	0,25	98,326	57,544	83,938
120	0,05	0,5	97,154	129,630	110,736
120	0,05	0,25	80,241	52,147	55,434



**Tabela 25** - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas, a seco.

V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	Raio de ponta [mm]	Ra experimental [μm]	Ra teórico [μm]	Rt experimental [μm]	Rt teórico [μm]
30	0,10	0,50	0,40	0,76	0,78	4,45	3,13
30	0,10	0,25	0,40	0,83		4,67	
30	0,05	0,50	0,40	0,32	0,20	3,88	0,78
30	0,05	0,25	0,40	0,26		2,44	
60	0,10	0,50	0,40	0,76	0,78	4,38	3,13
60	0,10	0,25	0,40	0,75		4,04	
60	0,05	0,50	0,40	0,61	0,20	8,18	0,78
60	0,05	0,25	0,40	0,24		2,04	
90	0,10	0,50	0,40	0,74	0,78	3,73	3,13
90	0,10	0,25	0,40	0,79		4,35	
90	0,05	0,50	0,40	0,40	0,20	4,48	0,78
90	0,05	0,25	0,40	0,29		2,59	
120	0,10	0,50	0,40	0,78	0,78	4,98	3,13
120	0,10	0,25	0,40	0,73		4,70	
120	0,05	0,50	0,40	0,43	0,20	6,22	0,78
120	0,05	0,25	0,40	0,26		2,37	

**Tabela 26** - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas, a seco.

V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	Raio de ponta [mm]	Ra experimental [μm]	Ra teórico [μm]	Rt experimental [μm]	Rt teórico [μm]
30	0,10	0,50	0,40	0,72	0,78	3,89	3,13
30	0,10	0,25	0,40	0,66		3,68	
30	0,05	0,50	0,40	0,28	0,20	2,47	0,78
30	0,05	0,25	0,40	0,27		2,49	
60	0,10	0,50	0,40	0,68	0,78	3,94	3,13
60	0,10	0,25	0,40	0,69		3,91	
60	0,05	0,50	0,40	0,32	0,20	4,02	0,78
60	0,05	0,25	0,40	0,27		3,22	
90	0,10	0,50	0,40	0,67	0,78	3,72	3,13
90	0,10	0,25	0,40	0,59		3,64	
90	0,05	0,50	0,40	0,27	0,20	2,61	0,78
90	0,05	0,25	0,40	0,29		2,95	
120	0,10	0,50	0,40	0,64	0,78	3,85	3,13
120	0,10	0,25	0,40	0,66		3,56	
120	0,05	0,50	0,40	0,25	0,20	2,56	0,78
120	0,05	0,25	0,40	0,23		2,52	

**Tabela 27** - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas novas e MQL.

V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	Raio de ponta [mm]	Ra experimental [μm]	Ra teórico [μm]	Rt experimental [μm]	Rt teórico [μm]
30	0,10	0,50	0,40	0,67	0,78	3,13	3,13
30	0,10	0,25	0,40	0,60		3,08	
30	0,05	0,50	0,40	0,29	0,20	1,87	0,78
30	0,05	0,25	0,40	0,22		1,70	
60	0,10	0,50	0,40	0,66	0,78	3,42	3,13
60	0,10	0,25	0,40	0,64		3,39	
60	0,05	0,50	0,40	0,28	0,20	2,72	0,78
60	0,05	0,25	0,40	0,25		1,94	
90	0,10	0,50	0,40	0,71	0,78	3,73	3,13
90	0,10	0,25	0,40	0,62		3,36	
90	0,05	0,50	0,40	0,33	0,20	3,05	0,78
90	0,05	0,25	0,40	0,22		1,69	
120	0,10	0,50	0,40	0,68	0,78	3,67	3,13
120	0,10	0,25	0,40	0,71		3,64	
120	0,05	0,50	0,40	0,30	0,20	2,64	0,78
120	0,05	0,25	0,40	0,22		1,70	

**Tabela 28** - Resultados experimentais da rugosidade para os diferentes parâmetros, com pastilhas desgastadas e MQL.

V <sub>c</sub> [m/min]	f [mm/rot]	a <sub>p</sub> [mm]	Raio de ponta [mm]	Ra experimental [μm]	Ra teórico [μm]	Rt experimental [μm]	Rt teórico [μm]
30	0,10	0,50	0,40	0,69	0,78	3,84	3,13
30	0,10	0,25	0,40	0,72		3,89	
30	0,05	0,50	0,40	0,26	0,20	2,31	0,78
30	0,05	0,25	0,40	0,29		1,92	
60	0,10	0,50	0,40	0,65	0,78	3,70	3,13
60	0,10	0,25	0,40	0,72		4,18	
60	0,05	0,50	0,40	0,26	0,20	1,86	0,78
60	0,05	0,25	0,40	0,27		1,83	
90	0,10	0,50	0,40	0,63	0,78	3,69	3,13
90	0,10	0,25	0,40	0,71		4,18	
90	0,05	0,50	0,40	0,23	0,20	1,74	0,78
90	0,05	0,25	0,40	0,23		1,78	
120	0,10	0,50	0,40	0,67	0,78	3,84	3,13
120	0,10	0,25	0,40	0,70		4,28	
120	0,05	0,50	0,40	0,23	0,20	2,24	0,78
120	0,05	0,25	0,40	0,18		1,66	

#### **ANEXO IV**

Valores obtidos nos ensaios  
experimentais, ensaios longos



**Tabela 29** – Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para  $V_c=30$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, a seco.

Passagem	Diâmetro inicial [mm]	$a_p$ [mm]	Diâmetro final [mm]	$V_c$ [m/min]	Rotação [rpm]	$f$ [mm/rot]	Comprimento de Corte [mm]	Tempo total de corte [min]	$V_B$ [mm]
1	16	0,5	15	30	596,83	0,1	60	1,01	0,0358
2	16	0,5	15	30	596,83	0,1	60	2,01	0,0387
3	15	0,5	14	30	636,62	0,1	60	2,95	0,0416
4	15	0,5	14	30	636,62	0,1	60	3,90	0,0473
5	14	0,5	13	30	682,09	0,1	60	4,78	0,0530
6	14	0,5	13	30	682,09	0,1	60	5,65	0,0620
7	13	0,5	12	30	734,56	0,1	60	6,47	0,0632
8	13	0,5	12	30	734,56	0,1	60	7,29	0,0747
9	28	0,5	27	30	341,05	0,1	60	9,05	0,1162
10	28	0,5	27	30	341,05	0,1	60	10,81	0,1203
11	27	0,5	26	30	353,68	0,1	60	12,50	0,1491
12	27	0,5	26	30	353,68	0,1	60	14,20	0,1795
13	26	0,5	25	30	367,28	0,1	60	15,83	0,2406

**Tabela 30** - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para  $V_c=90$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, a seco.

Passagem	Diâmetro inicial [mm]	$a_p$ [mm]	Diâmetro final [mm]	$V_c$ [m/min]	Rotação [rpm]	$f$ [mm/rot]	Comprimento de Corte [mm]	Tempo total de corte [min]	$V_B$ [mm]
1	27	0,5	26	90	1061,03	0,1	60	0,57	0,0530
2	26	0,5	25	90	1101,84	0,1	60	1,11	0,0587
3	26	0,5	25	90	1101,84	0,1	60	1,65	0,0773
4	25	0,5	24	90	1145,92	0,1	60	2,18	0,0802
5	25	0,5	24	90	1145,92	0,1	60	2,70	0,0960
6	24	0,5	23	90	1193,66	0,1	60	3,20	0,1089
7	24	0,5	23	90	1193,66	0,1	60	3,71	0,1189
8	23	0,5	22	90	1245,56	0,1	60	4,19	0,1246
9	23	0,5	22	90	1245,56	0,1	60	4,67	0,1334
10	22	0,5	21	90	1302,18	0,1	60	5,13	0,1454
11	22	0,5	21	90	1302,18	0,1	60	5,59	0,1475
12	21	0,5	20	90	1364,19	0,1	60	6,03	0,1521
13	21	0,5	20	90	1364,19	0,1	60	6,47	0,1526
14	20	0,5	19	90	1432,39	0,1	60	6,89	0,1561
15	20	0,5	19	90	1432,39	0,1	60	7,31	0,1648
16	19	0,5	18	90	1507,78	0,1	60	7,71	0,1737
17	19	0,5	18	90	1507,78	0,1	60	8,11	0,1776
18	18	0,5	17	90	1591,55	0,1	60	8,48	0,1903
19	18	0,5	17	90	1591,55	0,1	60	8,86	0,2207

**Tabela 31** - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para  $V_c=90$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=1$  mm, a seco.

Passagem	Diâmetro inicial [mm]	$a_p$ [mm]	Diâmetro final [mm]	$V_c$ [m/min]	Rotação [rpm]	$f$ [mm/rot]	Comprimento de Corte [mm]	Tempo total de corte [min]	$V_B$ [mm]
1	28	1	26	90	1023,14	0,1	60	0,59	0,106
2	26	1	24	90	1101,84	0,1	60	1,13	0,133
3	25	1	23	90	1145,92	0,1	60	1,65	0,175
4	24	1	22	90	1193,66	0,1	60	2,16	0,208

**Tabela 32** - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para  $V_c=30$  m/min,  $f=0,3$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, a seco.

Passagem	Diâmetro inicial [mm]	$a_p$ [mm]	Diâmetro final [mm]	$V_c$ [m/min]	Rotação [rpm]	$f$ [mm/rot]	Comprimento de Corte [mm]	Tempo total de corte [min]	$V_B$ [mm]
1	23	0,5	22	30	415,19	0,3	60	0,48	0,0903
2	22	0,5	21	30	434,06	0,3	60	0,94	0,1146
3	22	0,5	21	30	434,06	0,3	60	1,40	0,1305
4	21	0,5	20	30	454,73	0,3	60	1,84	0,1432
5	21	0,5	20	30	454,73	0,3	60	2,28	0,1750
6	20	0,5	19	30	477,46	0,3	60	2,70	0,1776
7	20	0,5	19	30	477,46	0,3	60	3,12	0,1978
8	19	0,5	18	30	502,59	0,3	60	3,52	0,2048

**Tabela 33** - Resultados experimentais para o teste de vida da ferramenta para  $V_c=30$  m/min,  $f=0,1$  mm/rot e  $a_p=0,5$  mm, com MQL.

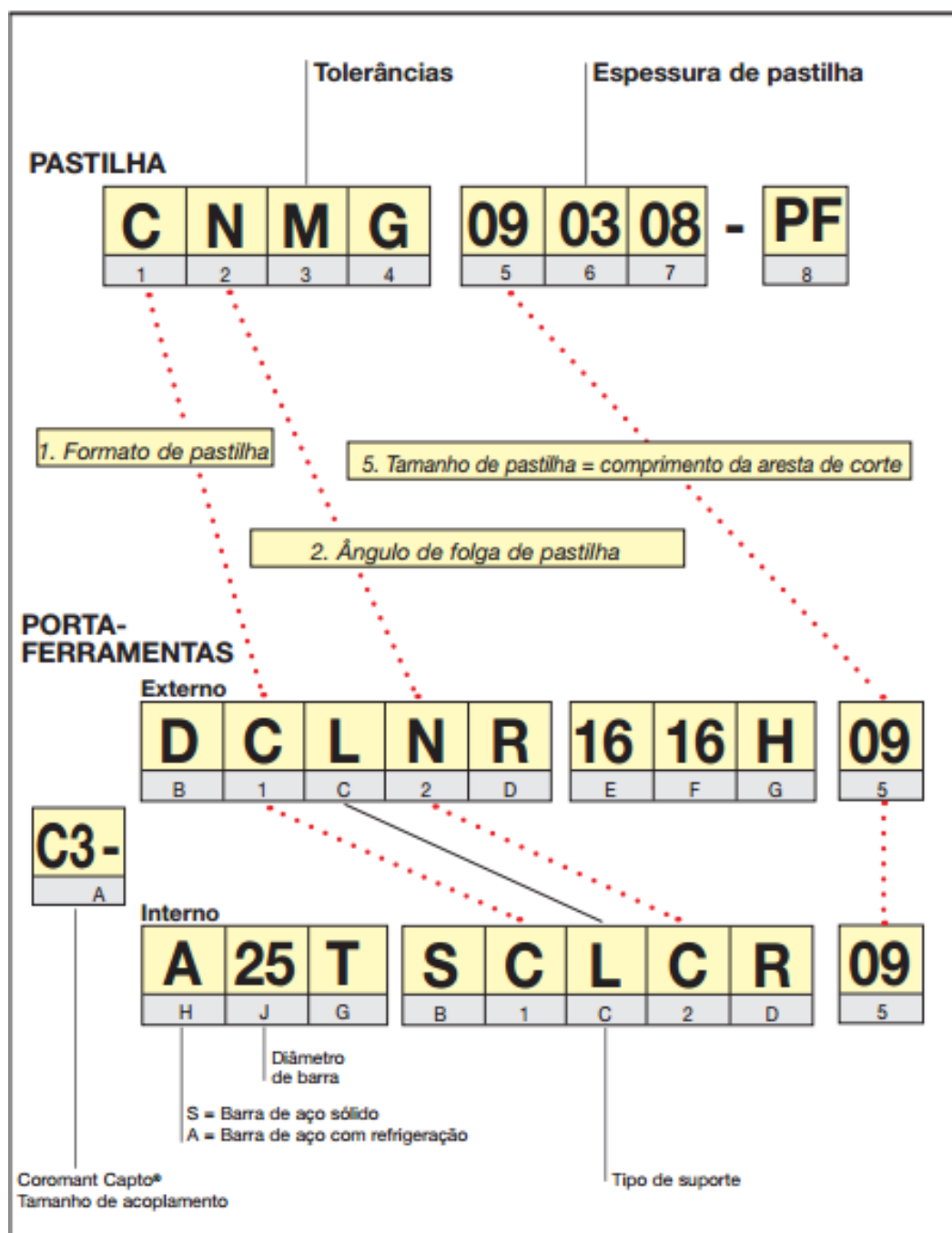
Passagem	Diâmetro inicial [mm]	$a_p$ [mm]	Diâmetro final [mm]	$V_c$ [m/min]	Rotação [rpm]	$f$ [mm/rot]	Comprimento de Corte [mm]	Tempo total de corte [min]	$V_B$ [mm]
1	21	0,5	20	30	454,73	0,1	60	1,32	0,0273
2	21	0,5	20	30	454,73	0,1	60	2,64	0,0817
3	20	0,5	19	30	477,46	0,1	60	3,90	0,0960
4	20	0,5	19	30	477,46	0,1	60	5,15	0,0988
5	19	0,5	18	30	502,59	0,1	60	6,35	
6	19	0,5	18	30	502,59	0,1	60	7,54	0,1017
7	18	0,5	17	30	530,52	0,1	60	8,67	
8	18	0,5	17	30	530,52	0,1	60	9,80	0,1232
9	17	0,5	16	30	561,72	0,1	60	10,87	
10	17	0,5	16	30	561,72	0,1	60	11,94	0,1276
11	16	0,5	15	30	596,83	0,1	60	12,94	
12	16	0,5	15	30	596,83	0,1	60	13,95	0,1361
13	15	0,5	14	30	636,62	0,1	60	14,89	
14	15	0,5	14	30	636,62	0,1	60	15,83	0,1447
15	24	0,5	23	30	397,89	0,1	60	17,34	0,1604
16	23	0,5	22	30	415,19	0,1	60	18,79	0,1790
17	22	0,5	21	30	434,06	0,1	60	20,17	0,2058



## **ANEXO V**

Descrição da referência das  
pastilhas de corte





<b>1. FORMATO DA PASTILHA</b>						<b>2. ÂNGULO DE FOLGA DA PASTILHA</b>														
80° <b>C</b>	55° <b>D</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	35° <b>V</b>	80° <b>W</b>	 5° <b>B</b>	 7° <b>C</b>	 0° <b>N</b>											
<b>4. TIPO DE PASTILHA</b>				<b>5. TAMANHO DE PASTILHA = COMPRIMENTO DA ARESTA DE CORTE</b>																
<b>A</b>	<b>G</b>																			
<b>M</b>	<b>T</b>																			
				<i>l mm:</i> 06-19    07-15    06-12    09-19    06-22    11-16    06-08																
<b>7. RAO DE PONTA</b>																				
		04 $r_e = 0.4$ 08 $r_e = 0.8$ 12 $r_e = 1.2$ 16 $r_e = 1.6$ 24 $r_e = 2.4$	<b>Recomendações de primeira escolha para o raio de ponta:</b>																	
			T-MAX P		CoroTurn 107															
			ACABAMENTO	08	04															
			USINAGEM MÉDIA	08	08															
			DESBASTE	12	08															
<b>8. GEOMETRIA — OPÇÃO DO FABRICANTE</b>																				
<p>O fabricante pode incluir mais dois símbolos ao código, para descrever a geometria da pastilha, por exemplo:</p> <p>-PF = ISO P Acabamento</p> <p>-MR = ISO M Desbaste</p>																				
<b>B. SISTEMA DE FIXAÇÃO</b>																				
<b>D</b> <i>Fixação rígida (RC)</i>		<b>M</b> <i>Fixação por cunha-grampo</i>		<b>P</b> <i>Fixação por alavanca</i>		<b>S</b> <i>Fixação por parafuso</i>														
<b>D. VERSÃO DA FERRAMENTA</b>			<b>E. ALTURA DA HASTE</b>			<b>G. COMPRIMENTO DE FERRAMENTA</b>														
<b>R</b> <i>Versão direita</i>						<b>Comprimento da ferramenta = <math>l_1</math> em mm</b>														
<b>L</b> <i>Versão esquerda</i>			<b>F. LARGURA DA FERRAMENTA</b>																	
<b>N</b> <i>Neutra</i>						<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">H = 100</td> <td style="width: 50%;">S = 250</td> </tr> <tr> <td>K = 125</td> <td>T = 300</td> </tr> <tr> <td>M = 150</td> <td>U = 350</td> </tr> <tr> <td>P = 170</td> <td>V = 400</td> </tr> <tr> <td>Q = 180</td> <td>W = 450</td> </tr> <tr> <td>R = 200</td> <td>Y = 500</td> </tr> </table>			H = 100	S = 250	K = 125	T = 300	M = 150	U = 350	P = 170	V = 400	Q = 180	W = 450	R = 200	Y = 500
H = 100	S = 250																			
K = 125	T = 300																			
M = 150	U = 350																			
P = 170	V = 400																			
Q = 180	W = 450																			
R = 200	Y = 500																			